



TESIS-TM 142501

**OPTIMASI MULTI RESPON PROSES GURDI CARBON
FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP) DENGAN
METODE BACKPROPAGATION NEURAL
NETWORK-PARTICLE SWARM OPTIMIZATION
(BPNN-PSO)**

RACHMADI NORCAHYO
NRP 2115201001

DOSEN PEMBIMBING
Ir. Bobby O. P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA DAN SISTEM MANUFAKTUR
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



TESIS - TM 142501

**OPTIMASI MULTI RESPON PROSES GURDI
CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP)
DENGAN METODE BACKPROPAGATION NEURAL
NETWORK-PARTICLE SWARM OPTIMIZATION
(BPNN-PSO)**

RACHMADI NORCAHYO
NRP 2115201001

Dosen Pembimbing
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA DAN SISTEM MANUFAKTUR
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



THESIS - TM 142501

**MULTI RESPONSE OPTIMIZATION OF CARBON
FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP) DRILLING
USING BACKPROPAGATION NEURAL NETWORK-
PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (BPNN-PSO)**

RACHMADI NORCAHYO
NRP 2115201001

Advisor
Ir. Bobby Oedy P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

MASTER PROGRAM
FIELD STUDY OF ENGINEERING AND MANUFACTURING SYSTEM
DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2017

**LEMBAR PENGESAHAN
TESIS**

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
Rachmadi Norcahyo
NRP. 2115201001

Tanggal Ujian : 14 Juli 2017
Periode Wisuda : September 2017

Disetujui oleh:



1. Ir. Bobby O. P. Soepangkat, M.Sc. Ph.D.
NIP: 195305161978031001

(Pembimbing)

2. Prof. Dr.Ing. Ir. Suhardjono, M.Sc.
NIP: 196206041987011001

(Penguji)

3. Dr.Eng. Sutikno, S.T., M.T.
NIP: 197407032000031001

(Penguji)

4. Arif Wahyudi, S.T., M.T., Ph.D.
NIP: 197303222001121001

(Penguji)


Dekan Fakultas Teknologi Industri


Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.
NIP. 196905071995121001

OPTIMASI MULTI RESPON PROSES GURDI CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP) DENGAN METODE BACKPROPAGATION NEURAL NETWORK–PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (BPNN-PSO)

Nama Mahasiswa : Rachmadi Norcahyo
NRP : 2115201001
Pembimbing : Ir. Bobby O. P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Penggunaan material komposit di industri penerbangan telah mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Material komposit dipilih karena memiliki kekuatan yang tinggi dengan berat yang rendah, sifat mampu bentuk yang baik, ketahanan terhadap korosi dan keausan yang tinggi, serta arah kekuatan yang dapat dikendalikan. Proses perakitan komponen yang terbuat dari komposit dengan komponen lainnya umumnya dilakukan dengan menggunakan mur, baut dan keling. Proses perakitan ini membutuhkan lubang yang dihasilkan dari proses gurdi. Lubang hasil penggurdi yang tidak sesuai dengan spesifikasi akan menyebabkan terjadinya kegagalan pada sambungan. Untuk menghasilkan lubang yang sesuai dengan spesifikasi, dibutuhkan pemilihan parameter proses penggurdi yang tepat dengan melakukan optimasi terhadap karakteristik kualitas yang kritis (KKK) atau *critical to quality characteristics* (CTQs) dari lubang. CTQs dari lubang hasil proses gurdi antara lain adalah gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar. Spesifikasi dari keempat CTQs tersebut adalah semakin kecil semakin baik (*smaller is better*). Agar spesifikasi dari keempat CTQs tersebut tercapai, maka perlu dilakukan optimasi multirespon.

Metode optimasi yang digunakan pada penelitian ini adalah gabungan antara metode *backpropagation neural network* dengan metode *particle swarm optimisation* (BPNN-PSO). Parameter-parameter proses gurdi yang divariasikan adalah geometri ujung pahat, kecepatan spindel dan kecepatan makan. Geometri ujung pahat yang digunakan adalah *x type* dan *brad & spur*. Kecepatan spindel divariasikan sebesar 1000 rpm, 2000 rpm dan 3000 rpm. Kecepatan makan divariasikan sebesar 50 mm/min, 150 mm/min dan 250 mm/min. Rancangan percobaan ditetapkan dengan menggunakan rancangan faktorial 2 x 3 x 3, dan replikasi dilakukan sebanyak 3 kali. Material komposit yang digunakan adalah *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP). Parameter-parameter respon yang dioptimasi pada penelitian ini adalah gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar. Gaya tekan dan torsi diukur dengan dinamometer, sedangkan delaminasi diukur dengan cara membuat perbandingan antara diameter maksimum delaminasi yang diamati dengan diameter lubang nominal.

Pengembangan jaringan BPNN menghasilkan arsitektur jaringan 3-12-4, yang memiliki arti jaringan terdiri dari 3 *input layer*, 1 *hidden layer* dengan 12

neuron dan 4 *output layer*. Fungsi-fungsi aktivasi yang digunakan pada *hidden layer*, *output layer* dan pelatihan BPNN secara berturut-turut adalah tansig, purelin, dan trainlm. Optimasi PSO menghasilkan kombinasi dari parameter-parameter proses yang dapat meminimalkan respon secara serentak, yaitu geometri ujung pahat *x type*, kecepatan spindel sebesar 2993 rpm dan kecepatan makan sebesar 79 mm/menit. Hasil eksperimen konfirmasi dengan menggunakan pengaturan parameter proses tersebut mampu menghasilkan nilai respon yang minimum, sesuai dengan nilai respon hasil prediksi BPNN.

Kata kunci: BPNN-PSO, CFRP, optimasi multirespon, proses gurdi.

Multi Response Optimization of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Drilling Using Back Propagation Neural Network-Particle Swarm Optimization (BPNN-PSO)

Name : Rachmadi Norcahyo
NRP : 2115201001
Advisor : Ir. Bobby O. P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials usage in the aircraft structural component, such as wings and rudder, have increased significantly. Drilling of these composite structure is essential to install fasteners for assembly. Thrust force, torque, hole entry delamination and hole exit delamination are some responses that used to evaluate the performance of drilling process. The quality characteristic of these responses are “smaller-is-better.” The aim of this experiment is to identify the combination of process parameters for achieving required multiple performance characteristic in drilling process of CFRP composite materials. The three important process parameters such as drill geometry, spindle speed and feeding speed were used as input parameters. Drill type was set at two different levels, while the other two were set at three different levels. Hence, a 2 x 3 x 3 full factorial was used as design experiments, the experiments were replicated three times. The optimization was conducted by using the combination of backpropagation neural network method and particle swarm optimisation method (BPNN-PSO). The architecture of developed BPNN network had 3 input layers, 1 hidden layer with 12 neurons and 4 output layers. The activation functions of hidden layer, output layer and network training were tansig, purelin and trainlm respectively. The minimum thrust force, torque, hole entry delamination and hole exit delamination could be obtained by using x type drill geometry, spindle speed and feed speed of 2993 rpm and 79 mm/min respectively.

Key words: BPNN-PSO, CFRP, drilling process, multi response optimization.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah. Segala puji dan syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan segala berkah dan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Tesis dengan judul “**OPTIMASI MULTI RESPON PROSES GURDI CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP) DENGAN METODE BACKPROPAGATION NEURAL NETWORK–PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (BPNN-PSO)**” disusun sebagai persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Rekayasa dan Sistem Manufaktur, Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Adapun keberhasilan penulisan dalam penyusunan laporan ini tidak lepas berbagi pihak yang telah banyak memberikan bantuan, motivasi, dan dukungan. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak **Ir. Bobby O. P. Soepangkat, M.Sc., Ph.D.** selaku dosen pembimbing yang telah memberikan saran, petunjuk serta bimbingannya sehingga penulis mampu menyelesaikan tesis ini.
2. Bapak **Prof. Dr.Eng. Ir. Prabowo, M.Eng** Kepala Program Studi Pascasarjana Departemen Teknik Mesin FTI-ITS.
3. Bapak **Prof. Dr.Eng. Ir. Suhardjono, M.Sc.**, bapak **Arif Wahjudi, S.T., M.T., Ph.D.**, dan bapak **Dr.Eng. Sutikno, S.T., M.T.** sebagai dosen penguji, atas saran dan masukan yang telah diberikan untuk menyempurnakan tesis ini.
4. Bapak **Bayu Nuraga Wibawa**, sebagai *Manager Production Engineering Shop* GMF AeroAsia.
5. Bapak **Prof. Ir. Budi Santosa, M.Sc., Ph.D.** dari Departemen Teknik Industri FTI-ITS yang telah memberi kesempatan untuk mengikuti kuliah Metoda Metaheuristik.
6. **Eyang Susilo** atas doa dan restunya.

7. **Mama, Papa, Kakak, Mb. Dewi, Yoko dan Yoga** yang selalu memberikan cinta kasih, doa dan dukungannya kepada saya.
8. **Teman–teman seperjuangan Pascasarjana Teknik Mesin 2015, 2014 dan 2016** atas segala canda, tawa dan ilmu dibagikan selama ini.
9. **Angga Sateria** sebagai rekan dalam pengerjaan tesis ini atas dukungan, bantuan dan kerjasamanya.
10. Rekan-rekan karyawan Lab. Manufaktur **Mas Faisal** dan **Pak Sugianto**, atas support dan bantuannya.
11. Siswa SMK PSG Lab. Manufaktur **Irsyam** dan **Gifary** atas bantuannya selama proses penelitian.
12. Seluruh staf dan karyawan Departemen Teknik Mesin.
13. Sahabat dari kecil **Pandu, Giovani, Dika, Bima, Soffy, Dhillia, Pita, Rima, Nike** untuk semua kebahagiaan dan pengalaman yang dibagi selama ini.
14. Semua pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu, kami ucapkan terima kasih.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penyusunan laporan tesis ini masih belum sempurna, untuk itu kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Akhir kata penulis senantiasa berdoa agar segala bantuan yang diberikan akan mendapat balasan dan rahmat dari Allah SWT. Semoga hasil dari laporan tesis ini dapat bermanfaat sebagaimana yang diharapkan. Amin

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL INDONESIA	i
HALAMAN JUDUL INGGRIS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah dan Asumsi	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Kajian Pustaka	5
2.2 Dasar Teori	7
2.2.1 Proses Gurdi	7
2.2.2 Geometri Pahat	9
2.2.3 Gaya Pemotongan pada Proses Gurdi	10
2.2.4 Material Komposit	13
2.2.4.1 Pengertian Material Komposit	13
2.2.4.2 Klasifikasi Material Komposit	16
2.2.4.3 Fiber Reinforced Composite Material	18
2.2.4.4 Polymer Matrix Composite	19
2.2.5 Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)	20
2.2.6 Delaminasi	21
2.2.7 Metode Prediksi Backpropagation Neural Network (BPNN) ..	23
2.2.8 Preprocessing data eksperimen	28
2.2.9 Penghitungan Hasil Prediksi dengan BPNN	29
2.2.10 Metode Optimasi Particle Swarm Optimization (PSO)	29
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1 Diagram Alir Penelitian	33
3.2 Parameter Penelitian	34
3.2.1 Parameter Proses	35
3.2.2 Parameter Respon	35
3.2.3 Parameter Konstan	35
3.3 Peralatan dan Bahan Penelitian	35
3.3.1 Peralatan Penelitian	35
3.3.2 Bahan Penelitian	39
3.4 Rancangan Percobaan	42
3.4.1 Parameter Proses pada Mesin Gurdi	42
3.4.2 Pemilihan Desain Eksperimen	42

3.5	Prosedur Percobaan.....	43
3.6	Pengukuran Data Respon.....	44
3.6.1	Pengukuran Gaya Tekan dan Torsi.....	44
3.6.2	Pengukuran Delaminasi	45
3.7	Karakteristik Respon Optimal	46
3.8	Metode Optimasi Nilai Respon dengan Menggunakan Backpropagation Neural Network (BPNN) dan Particle Swarm Optimization (PSO).	46
BAB 4 OPTIMASI MULTI RESPON DAN PEMBAHASAN		53
4.1	Data Hasil Pengukuran	53
4.2	Metode Prediksi Back Propagation Neural Network (BPNN)	55
4.2.1	Pre-processing (normalisasi) data input dan output.....	55
4.2.2	Penentuan Arsitektur Jaringan	58
4.2.3	Penentuan Kriteria Pemberhentian BPNN.....	61
4.2.4	Data Prediksi BPNN	62
4.3	Metode Optimasi Particle Swarm Optimization (PSO).....	65
4.3.1	Penentuan Fungsi Fitness.....	65
4.3.2	Penentuan Batas Atas dan Batas Bawah Parameter Proses. ..	66
4.3.3	Penentuan Parameter Parameter Optimasi PSO:	67
4.4	Hasil Optimasi PSO	67
4.5	Eksperimen Konfirmasi	68
4.6	Pengujian Kesamaan Rata-Rata Hasil Eksperimen Konfirmasi dengan Hasil Prediksi BPNN-PSO.....	69
4.6.1	Pengujian one sample t-test untuk respon gaya tekan.....	70
4.6.2	Pengujian one sample t-test untuk respon torsi.....	70
4.6.3	Pengujian one sample t-test untuk respon delaminasi lubang masuk.	70
4.6.4	Pengujian one sample t-test untuk respon delaminasi lubang keluar.....	70
4.7	Pengaruh Parameter Proses Terhadap Nilai Respon.....	71
4.7.1	Pengaruh Parameter Proses Terhadap Gaya Tekan	71
4.7.2	Pengaruh Parameter Proses terhadap Torsi.....	74
4.7.3	Pengaruh Parameter Proses Terhadap Delaminasi Lubang Masuk.....	75
4.7.4	Pengaruh Parameter Proses Terhadap Delaminasi Lubang Keluar.....	79
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		83
5.1	Kesimpulan	83
5.2	Saran	83
DAFTAR PUSTAKA		85
LAMPIRAN.....		89
BIOGRAFI PENULIS		107

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Elemen Dasar Proses Gurdi (Rochim, 1993).....	8
Gambar 2.2 Geometri Pahat Gurdi (Twist Drill) (Rochim, 1993)	9
Gambar 2.3 (a) Teori Pemotongan Geram (b) Arah Gaya-Gaya Reaksi Pemotongan (Lingkaran Gaya Pemotongan) (c) Analisa Geram (Rochim, 1993).....	11
Gambar 2.4 Gaya Pemotongan pada Proses Gurdi (Rochim, 1993)	13
Gambar 2.5 Komposisi Komposit (Rijswijk dkk., 2001)	14
Gambar 2.6 Diagram Uji Tarik pada FRP Komposit (Callister, 2007)	16
Gambar 2.7 Klasifikasi Komposit Berdasarkan Matriksnya	17
Gambar 2.8 Klasifikasi Komposit Berdasarkan Strukturnya (Callister, 2007).	18
Gambar 2.9 Perbandingan Properti Komposit dengan Matriks Polimer untuk 3 Jenis Serat Penguat (Gelas, Karbon Dan Aramid) pada Fraksi Volume Fiber 0,60 (Callister, 2007).....	20
Gambar 2.10 Sifat Mekanik Material Komposit Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) (Cytec, 2016).....	21
Gambar 2.11 Mekanisme Delaminasi pada Komposit Laminat (a). Peel Up Delamination (b) Push Out Delamination (Karimi dkk., 2017)	22
Gambar 2.12 Ilustrasi dari Skema Pengukuran Faktor Delaminasi Skematik pada Spesimen Benda Uji (Palanikumar, 2011)	22
Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian	33
Gambar 3.2 Mesin CNC Brother TC-22A-O	36
Gambar 3.3 Dinamometer Tipe 9272	36
Gambar 3.4 Charge Amplifier Tipe 5070A.....	37
Gambar 3.5 Akusisi Data Tipe 5697A	37
Gambar 3.6 Notebook Compaq Presario CQ35-336TX.....	38
Gambar 3.7 Mikroskop Makro Carl Zeiss Stemi DV4 Series Stereomicroscopes	38
Gambar 3.8 Mesin Gerinda Pahat Gurdi Vertex	39
Gambar 3.9 Mistar Ingsut.....	39
Gambar 3.10 (a) Pahat Carbide Sumitomo (b) Pahat HSS Solid	40
Gambar 3.11 (a) Mesin Hot Blanket merk Heatcon (b) Hot Blanket pada Proses Curing CFRP	41
Gambar 3.12 Spesimen CFRP Setelah Proses Curing.....	41
Gambar 3.13 Pemasangan Peralatan pada Proses Penggurdian CFRP	43
Gambar 3.14 Proses Pengukuran Data Gaya Tekan dan Torsi dengan Menggunakan Dinamometer pada Penggurdian Material CFRP	44
Gambar 3.15 (a) Grafik Pengukuran Gaya Tekan (b) Grafik Pengukuran Torsi (c) Posisi Pahat Pada Grafik Gaya Tekan dan Torsi.....	45
Gambar 3.16 Langkah-Langkah Metode Optimasi PSO.....	49
Gambar 3.17 Langkah-Langkah Optimasi Jaringan BPNN	52
Gambar 4.1 Pengaruh Jumlah Neuron terhadap Nilai Mean Square Error (MSE)	60
Gambar 4.2 Arsitektur Jaringan BPNN	61
Gambar 4.3 Perbandingan Nilai Respon Hasil Eksperimen dengan Nilai Respon Hasil Prediksi BPNN untuk Data Training	63
Gambar 4.4 Perbandingan Nilai Respon Hasil Eksperimen dengan Nilai Respon Hasil Prediksi BPNN untuk Data Testing	64

Gambar 4.5 Perbandingan Nilai Respon Hasil Eksperimen dengan Nilai Respon Hasil Prediksi BPNN untuk Data Validasi	65
Gambar 4.6 Pengaruh Kecepatan Spindel Terhadap Gaya Tekan Dengan Variasi Kecepatan Makan Untuk Geometri Ujung Pahat (a) X Type (b) Brad & Spur	73
Gambar 4.7 Pengaruh Kecepatan Makan Terhadap Gaya Tekan Dengan Variasi Kecepatan Spindel Untuk Geometri Ujung Pahat (a) X Type (b) Brad & Spur	73
Gambar 4.8 Pengaruh Kecepatan Spindel Terhadap Torsi Dengan Variasi Kecepatan Makan Untuk Geometri Ujung Pahat (a) X Type (b) Brad & Spur	74
Gambar 4.9 Pengaruh Kecepatan Makan Terhadap Torsi Dengan Variasi Kecepatan Spindel Untuk Geometri Ujung Pahat (a) X Type (b) Brad & Spur.....	75
Gambar 4.10 Pengaruh Kecepatan Spindel Terhadap Delaminasi Lubang Masuk Dengan Variasi Kecepatan Makan Untuk Geometri Ujung Pahat (a) X Type (b) Brad & Spur	76
Gambar 4.11 Delaminasi Lubang Masuk untuk (a) Geometri Ujung Pahat X Type dan (b) Geometri Ujung Pahat Brad & Spur pada Proses Gurdi dengan Kecepatan Spindel 1000 rpm dan Kecepatan Makan 250 mm/min.....	77
Gambar 4.12 Delaminasi Lubang Masuk untuk (a) Kecepatan Spindel 1000 rpm dan (b) Kecepatan Spindel 3000 rpm pada Proses Gurdi dengan Geometri Ujung Pahat X Type dan Kecepatan Makan 250 mm/min	77
Gambar 4.13 Pengaruh Kecepatan Makan Terhadap Delaminasi Lubang Masuk Dengan Variasi Kecepatan Spindel Untuk Geometri Ujung Pahat (a) X Type (b) Brad & Spur	78
Gambar 4.14 Delaminasi Lubang Masuk untuk (a) Kecepatan Makan 50 mm/min dan (b) Kecepatan Makan 250 mm/min pada Proses Gurdi dengan Geometri Ujung Pahat X Type dan Kecepatan Spindel 1000 rpm	78
Gambar 4.15 Pengaruh Kecepatan Spindel Terhadap Delaminasi Lubang Keluar Dengan Variasi Kecepatan Makan Untuk Geometri Ujung Pahat (a) X Type (b) Brad & Spur	80
Gambar 4.16 Delaminasi Lubang Keluar untuk (a) Geometri Ujung Pahat X Type dan (b) Geometri Ujung Pahat Brad & Spur pada Proses Gurdi dengan Kecepatan Spindel 1000 rpm dan Kecepatan Makan 250 mm/min.....	80
Gambar 4.17 Delaminasi Lubang Keluar untuk (a) Kecepatan Spindel 1000 rpm dan (b) Kecepatan Spindel 3000 rpm pada Proses Gurdi dengan Geometri Ujung Pahat Brad & Spur dan Kecepatan Makan 250 mm/min.....	81
Gambar 4.18 Pengaruh Kecepatan Makan Terhadap Delaminasi Lubang Keluar Dengan Variasi Kecepatan Spindel Untuk Geometri Ujung Pahat (a) X Type (b) Brad & Spur	81
Gambar 4.19 Delaminasi Lubang Keluar untuk (a) Kecepatan Makan 50 mm/min dan (b) Kecepatan Makan 250 mm/min pada Proses Gurdi dengan Geometri Ujung Pahat Brad & Spur dan Kecepatan Spindel 1000 rpm...	82

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat-Sifat Mekanik dari Bahan Serat Fiber dan Wire	18
Tabel 3.1 Parameter Proses dan Pengaturan Level.....	42
Tabel 3.2 Desain Eksperimen Faktorial 2 x 3 x 3	42
Tabel 4.1 Data Hasil Eksperimen	53
Tabel 4.2 Normalisasi Nilai Data Input dan Respon	56
Tabel 4.3 Kombinasi Parameter BPNN untuk Penentuan Jumlah Neuron	59
Tabel 4.4 Kombinasi Parameter BPNN untuk Penentuan Jumlah Hidden Layer ..	60
Tabel 4.5 Data Training	62
Tabel 4.6 Data Testing	63
Tabel 4.7 Data Validasi	64
Tabel 4.8 Nilai Batas Bawah dan Batas Atas Interval.....	67
Tabel 4.9 Parameter Proses Terpilih dari Optimasi PSO dan Prediksi Respon	68
Tabel 4.10 Hasil Eksperimen Konfirmasi	69
Tabel 4.11 Perbandingan Nilai Respon Hasil Eksperimen Konfirmasi dan Prediksi BPNN	69
Tabel 4.12 Data Hasil Eksperimen Sesuai Dengan Rancangan Percobaan Faktorial 2 x 3 x 3	72

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan material komposit semakin meningkat pada industri penerbangan dan industri otomotif dalam 20 tahun terakhir. Peningkatan aplikasi material komposit disebabkan oleh keunggulan sifat mekanik dari material ini seperti ketangguhan yang tinggi, kekakuan yang baik, ketahanan *fatigue* yang lebih baik dan bobot yang lebih ringan dari material metal seperti baja atau aluminium. Penggantian material metal dengan material komposit seperti *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) juga meningkatkan kebutuhan akan pengetahuan metode fabrikasi komponen-komponen yang terbuat dari komposit agar produk yang dihasilkan dapat sesuai dengan spesifikasi dan tanpa cacat. Diantara beberapa proses pemesinan konvensional, gurdi menjadi proses pemesinan yang membutuhkan perhatian lebih. Hal ini diakibatkan oleh proses pembuatan lubang pada komponen komposit adalah proses pemesinan yang umum dan banyak dilakukan. Lubang pada komponen yang terbuat dari material komposit bertujuan agar satu komponen dengan komponen lainnya dapat dirakit sehingga menjadi produk yang utuh. Sebagai contoh 22% frame pesawat *Airbus A 380* terbuat dari material komposit (Ye dkk., 2005) dengan 2 jenis material komposit yaitu *carbon fiber reinforce polymer* (CFRP) sebesar 22% dan glass aluminium reinforced epoxy (GLARE) sebesar 3% (Vlot dkk., 2001). Perakitan komponen struktur pesawat terbang dilakukan dengan menggunakan pengunci berupa mur, baut dan keling, yang membutuhkan proses gurdi untuk membuat lubang. Jumlah lubang yang dibutuhkan untuk perakitan pesawat terbang bervariasi mulai dari 300.000 lubang pada pesawat tempur hingga 1,5-3 juta lubang pada pesawat komersial (Mouritz, 2012). Perlakuan ekstra perlu dilakukan untuk menghindari terjadinya delaminasi saat proses gurdi komposit, karena akan menyebabkan cacat berupa *crack* pada struktur badan pesawat. Cacat ini yang dapat mengurangi umur hidup pesawat terbang dan menambah biaya untuk perawatan. Pembuatan lubang pada komponen pesawat terbang dengan proses gurdi memerlukan pemilihan parameter proses yang tepat untuk agar kualitas lubang yang dihasilkan memenuhi spesifikasi.

Kinerja dari proses gurdi pada material komposit dapat dievaluasi berdasarkan beberapa karakteristik kualitas yang kritis, salah satunya adalah delaminasi (Nagaraja dkk., 2013). Delaminasi menyebabkan penyimpangan pada toleransi lubang dan menjadi penyebab utama terjadinya penurunan performa komposit *laminated* dalam kurun waktu yang panjang (Capello, 2004). Khashaba (2004) menyatakan bahwa lebih kurang 60% produk cacat pada industri penerbangan disebabkan oleh delaminasi. Evaluasi terhadap kinerja gaya tekan dan torsi dari proses gurdi pada material komposit juga dapat menggunakan gaya tekan dan torsi. Gaya tekan, torsi dan delaminasi tersebut adalah respon yang merupakan fungsi dari parameter-parameter proses atau faktor. Oleh karena itu, pada proses gurdi material komposit perlu dilakukan pengaturan yang tepat terhadap level-level dari parameter-parameter proses agar menghasilkan lubang yang sesuai dengan spesifikasi yang disyaratkan.

Metode yang populer dalam beberapa tahun terakhir untuk menyelesaikan permasalahan optimasi adalah metode *soft computing* berupa *backpropagation neural network* (BPNN) digabungkan dengan *particle swarm optimization* (PSO). BPNN merupakan algoritma pembelajaran pada *artificial neural network* (ANN) yang berfungsi untuk mempelajari hubungan antara parameter proses (*input*) dengan respon (*output*), sehingga BPNN mampu melakukan prediksi terhadap nilai respon yang akan didapat dengan menggunakan parameter proses yang ditentukan. Salah satu metode yang sering digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi multi respon adalah metode PSO. PSO mampu mengidentifikasi nilai optimum secara global dengan keakuratan yang tinggi (Rao, 2009). Penggabungan metode ANN dengan PSO mampu digunakan untuk memprediksi dan menentukan parameter optimal yang menghasilkan gaya tekan, torsi dan getaran yang minimal pada proses gurdi arah longitudinal dan transversal pada material (Shunmugesh dkk., 2016).

Berdasarkan hal-hal yang telah dipaparkan, maka akan dilakukan penelitian tentang pengaturan parameter proses penggurdian pada material komposit *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP). Penelitian ini dilakukan untuk meminimalkan parameter respon gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi delaminasi lubang keluar secara serentak. Karakteristik kualitas dari

semua parameter respon adalah lebih kecil lebih baik (*smaller is better*). Parameter-parameter proses atau faktor-faktor yang divariasikan adalah geometri ujung pahat, kecepatan spindel dan kecepatan makan. Metode optimasi yang digunakan adalah *backpropagation neural network* (BPNN)-*particle swarm* optimization (PSO).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana arsitektur jaringan *backpropagation neural network* (BPNN) yang tepat untuk memprediksi nilai respon gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar pada proses gurdi material *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP).
2. Bagaimana pengaturan dari level-level parameter-parameter proses gurdi dengan menggunakan *particle swarm optimization* (PSO) yang menghasilkan nilai respon gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar yang minimum pada proses gurdi material *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP).

1.3 Batasan Masalah dan Asumsi

Batasan masalah yang diberlakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tidak membahas proses pembuatan material komposit.
2. Pahat gurdi memiliki 2 alur/*flute*.
3. Dinamometer yang digunakan adalah Kistler tipe 9272.
4. Mesin yang digunakan adalah CNC *taping center* Brother TC-22A-O.
5. Proses gurdi tidak menggunakan cairan pendingin.

Asumsi-asumsi yang diberlakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Parameter-parameter yang tidak diteliti dianggap selalu konstan dan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap hasil penelitian.
2. Tidak ada interaksi antar parameter.
3. Mesin bekerja dalam kondisi baik.

4. Alat ukur yang digunakan dalam keadaan baik dan terkalibrasi.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui arsitektur jaringan *backpropagation neural network* (BPNN) yang tepat untuk memprediksi nilai respon gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar pada proses gurdi material *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP).
2. Mengetahui pengaturan level-level dari parameter-parameter proses gurdi dengan menggunakan *particle swarm optimization* (PSO) yang dapat meminimumkan nilai respon gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar secara serentak pada penggurdian material *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP)

1.5 Manfaat Penelitian

Kontribusi atau manfaat yang dapat diberikan melalui penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Meningkatkan pengetahuan tentang proses gurdi pada material komposit *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) yang membahas pengaruh parameter-parameter proses terhadap gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar.
2. Sebagai bahan referensi bagi penelitian selanjutnya dalam rangka pengembangan ilmu pengetahuan tentang gurdi komposit dan parameter-parameter proses terhadap gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Fiber reinforced plastic (FRP) adalah material komposit yang saat ini digunakan untuk berbagai aplikasi yang canggih dalam industri modern. Bahan konvensional seperti metal mulai digantikan dengan FRP terutama *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP), *glass fiber reinforced polymer* (GFRP) dan *kevlar fiber reinforced polymer* (KFRP). Hal ini dilakukan untuk mengambil keuntungan dari rasio kekuatan-berat yang baik, daya tahan dan ketahanan korosi yang tinggi. Material komposit jenis CFRP, GFRP dan KFRP digunakan sebagai material pengganti metal untuk lambung pesawat dan sayap. Sifat material komposit tergantung pada komposisi serat, orientasi serat dan jenis resin yang digunakan. Proses penggurdian paling sering digunakan dalam proses pemesinan material komposit. Lubang hasil proses penggurdian pada komponen yang terbuat dari material komposit bertujuan agar satu komponen dengan komponen lainnya dapat dirakit sehingga menjadi produk yang utuh. Sebagai contoh, terdapat 1,5-3 juta lubang pada pesawat komersial yang dibutuhkan untuk tujuan perakitan pesawat terbang.

Penelitian tentang proses gurdi pada material komposit telah diteliti oleh beberapa peneliti. Tsao (2012) menemukan bahwa kecepatan makan adalah faktor yang paling signifikan yang mempengaruhi delaminasi pada penggurdian *carbon fibre laminate* menggunakan *compound core special drill*. Montoya (2013) mempelajari mekanisme keausan, kualitas lubang dan gaya tekan pada penggurdian CFRP-Al menggunakan pahat *coated* dan *uncoated solid carbide*. Kesimpulan dari penelitian ini adalah besarnya keausan pahat pada penggurdian material CFRP lebih cepat terjadi jika dibandingkan dengan material metal karena bahan CFRP sangat abrasif. Turki (2014) melakukan eksperimen untuk menyelidiki material komposit *carbon/epoxy*. Penelitian ini menemukan bahwa kecepatan spindel dan kecepatan makan sangat mempengaruhi gaya potong, *crack propagation* dan delaminasi. Ozden (2012) menyelidiki proses pembuatan lubang pada material CFRP menggunakan pahat *multilayered tungsten carbide*. Penelitian ini menghasilkan

data tentang pengaruh kecepatan makan dan kecepatan potong pada delaminasi serta kekasaran permukaan. Penelitian ini merekomendasikan kombinasi tingkat kecepatan makan yang rendah dan kecepatan potong tinggi untuk hasil yang optimal pada penggurdian CFRP. Abhishek (2015) mengembangkan model persamaan matematika pada pemesinan CFRP untuk mengkorelasikan parameter proses *input* dengan hasil eksperimen menggunakan *optimisation based learning teaching* (TLBO). Penelitian ini menemukan bahwa hasil TLBO sebanding dengan yang diperoleh dengan algoritma genetika. Bonnet (2015) mempelajari efek kecepatan makan pada kerusakan lubang keluar selama penggurdian CFRP. Penelitian ini membuat korelasi antara kualitas permukaan dan orientasi serat dalam proses penggurdian. Eneyew (2014) mempelajari kualitas dan kerusakan permukaan lubang hasil penggurdian CFRP. Penelitian ini menemukan bahwa gaya tekan lebih dipengaruhi oleh kecepatan makan dari pada oleh kecepatan potong secara signifikan. Ameer (2017) mempelajari pengaruh kecepatan spindle dan kecepatan makan terhadap gaya tekan, delaminasi dan *cylindricity error* pada proses penggurdian material CFRP. Penelitian ini menemukan bahwa untuk meminimalkan gaya tekan dan delaminasi, kecepatan makan yang digunakan adalah 60 mm/min pada kecepatan spindle 3000 rpm.

Dalam 10 tahun terakhir metode *soft computing* seperti *artificial neural network* (ANN), *backpropagation neural network* (BPNN), *particle swarm optimization* (PSO) dan *genetic algorithm* (GA) mulai diterapkan untuk permasalahan optimasi proses pemesinan. Metode-metode *soft computing* terbukti cukup efektif untuk menyelesaikan permasalahan optimasi pada proses pemesinan, dengan waktu penyelesaian yang lebih cepat dan ketepatan yang lebih tinggi daripada metode optimasi yang berbasis statistik. Karnik (2008) menggunakan model *artificial neural network* (ANN) untuk memprediksi delaminasi yang terjadi pada penggurdian CFRP dengan kecepatan tinggi. Pahat gundi yang digunakan adalah *cemented carbide twist drill*. Karnik menyimpulkan bahwa kombinasi kecepatan makan yang rendah dengan kecepatan potong yang tinggi mengurangi terjadinya delaminasi pada lubang hasil proses gundi. Prediksi delaminasi juga dilakukan oleh Grilo (2013) dengan memilih kombinasi kecepatan potong, kecepatan makan dan geometri pahat dalam penggurdian CFRP. Tingkat produksi

yang tinggi dapat dicapai dengan pahat gurdi jenis *brad & spur* pada kecepatan potong dan kecepatan makan yang tinggi. Kualitas lubang hasil penggurdian orbital dari CFRP yang diteliti oleh Sadek (2012) menemukan bahwa gaya aksial akan meningkatkan kualitas lubang. Sardinas (2006) melakukan percobaan penggurdian CFRP menggunakan rancangan percobaan ortogonal array Taguchi kemudian melakukan optimasi dengan menggunakan GA. Balasubbareddy (2015) menggunakan algoritma *hybrid cuckoo search algorithm* yang secara efektif mampu menyelesaikan masalah optimasi multi objektif dengan validasi hasil berupa solusi pareto. Jiang (2014) menggunakan PSO dan GSA untuk masalah optimasi numerik dan menemukan bahwa algoritma ini lebih unggul dari algoritma lain dalam hal waktu komputasi dan jumlah iterasi untuk sampai pada hasil akhir. Shunmungesh (2016) melakukan optimasi pada proses gurdi arah longitudinal dan transversal pada material CFRP menggunakan metode ANN-GA dan ANN-PSO-GSA. Penelitiannya menyimpulkan bahwa ANN-GA dan ANN-PSO-GSA mampu digunakan untuk memprediksi dan menentukan parameter optimal yang menghasilkan gaya tekan, torsi, dan getaran yang minimal.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Proses Gurdi

Proses gurdi adalah proses pembuatan lubang silindris (*cylindrical hole*) pada benda kerja dengan menggunakan pahat gurdi. Pahat gurdi merupakan sebuah pahat pemotong yang memiliki sisi potong dan alur yang berhubungan secara berkesinambungan disepanjang badan pahat gurdi. Alur pada pahat gurdi dapat berbentuk lurus atau puntir yang berfungsi sebagai jalan keluarnya geram dan mengalirnya fluida pendingin. Pahat gurdi berputar dan menekan ke arah benda kerja untuk melakukan proses pemakanan ke dalam benda kerja. Selama proses pemotongan terjadi gerak relatif dan persinggungan antara pahat dan benda kerja yang menghasilkan geram (*chips*).

Elemen dasar dari proses penggurdian pada material benda kerja ditunjukkan pada Gambar 2.1. Menurut Rochim (1993) elemen-elemen dasar proses gurdi meliputi:

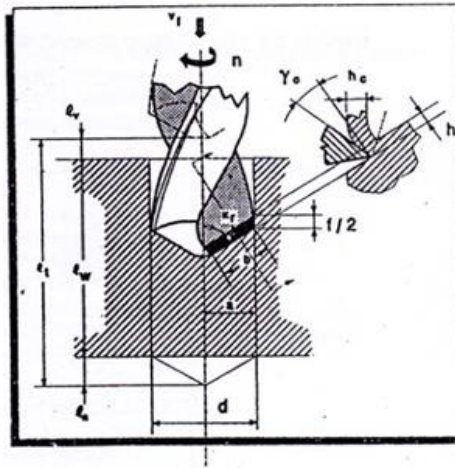
A. Pahat potong

a. Kecepatan Potong

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ [m/menit]} \quad (2.1)$$

b. Gerak makan per mata potong

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} \text{ [mm/putaran]} \quad (2.2)$$



Gambar 2.1 Elemen Dasar Proses Gurdi (Rochim, 1993)

c. Kedalaman potong per sisi potong

$$a = d/2 \text{ [mm]} \quad (2.3)$$

e. Lebar pemotongan

$$b = \frac{d}{2 \cdot \sin(K_r)} \text{ [mm]} \quad (2.4)$$

f. Luas pemotongan

$$A = a \cdot \frac{f}{2} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2.5)$$

g. Kecepatan penghasilan geram

$$Z = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot v_f}{4 \times 1000} \text{ [cm}^3\text{/menit]} \quad (2.6)$$

Dengan:

d = diameter pahat potong

z = jumlah gigi (mata potong)

v_f = kecepatan makan

K_r = sudut potong utama

B. Benda kerja

$$L_t = L_v + L_w + L_n \quad (2.7)$$

Dengan:

L_t = panjang total langkah pemotongan [mm]

L_v = langkah awal pemotongan [mm]

L_w = panjang pemotongan benda kerja [mm]

$$L_n \geq \frac{(d/2)}{\tan K_r} \quad (2.8)$$

$$L_v = \frac{(d/2)}{\tan K_r} \quad (2.9)$$

C. Mesin perkakas gurdi

a. Putaran poros utama mesin

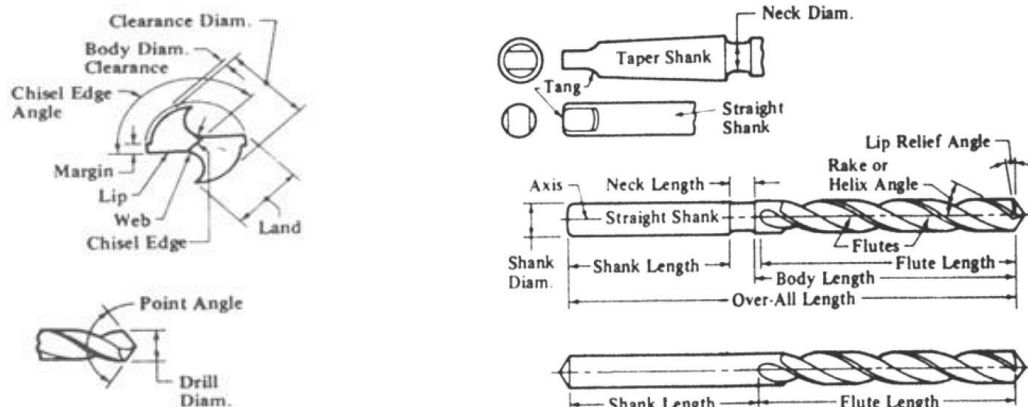
$$n = \frac{1000.v}{\pi.d} \text{ [rpm]} \quad (2.10)$$

b. Waktu pemotongan

$$t_c = L_t V_f \text{ [menit]} \quad (2.11)$$

2.2.2 Geometri Pahat

Proses gurdi pada umumnya dilakukan dengan menggunakan pahat gurdi berjenis *twist drill*. Nama-nama bagian pada pahat ini ditunjukkan oleh Gambar 2.2. Bagian yang paling utama pada pahat tersebut adalah sudut puntir (*helix/rake angle*), sudut ujung pahat/sudut potong utama (*point angle/lip angle*) dan sudut bebas (*clearance angle*).



Gambar 2.2 Geometri Pahat Gurdi (*Twist Drill*) (Rochim, 1993)

Bagian-bagian utama dari pahat *twist drill* adalah badan pahat (*body*), ujung runcing (*point*) dan tangkai (*shank*). *Twist drill* dapat diklasifikasikan menurut materialnya, jenis tangkainya, jumlah *flute*, ukuran diameter dan geometri pahatnya.

Berdasarkan jenis tangkainya, *twist drill* dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Rochim, 1993):

1. *Straight shank drill*: jenis pahat ini mempunyai tangkai berbentuk silinder.
2. *Taper shank drill*: jenis pahat ini mempunyai tangkai berbentuk konis, yang sesuai untuk langsung dipasang pada spindel mesin.

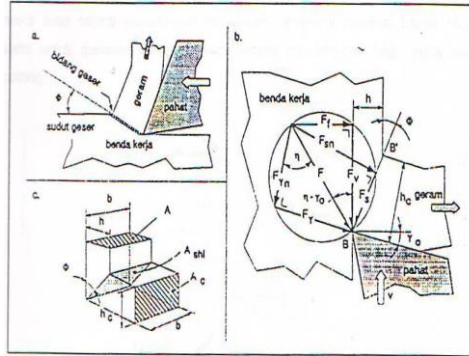
Berdasarkan jumlah *flute*, *twist drill* dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. *Single flute drill*: pahat ini mempunyai satu flute dan digunakan untuk proses drill pada material plastik.
2. *Two flute drill*: pahat ini merupakan tipe drill konvensional.
3. *Three flute drill*: pahat ini merupakan tipe *twist drill* yang relatif baru dikembangkan pada proses pemotongan logam (*metal cutting*).

2.2.3 Gaya Pemotongan pada Proses Gurdi

Pemotongan pada proses pemesinan merupakan akibat dari timbulnya konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh gaya tekan dari mata potong pahat. Tegangan pada benda kerja tersebut mempunyai orientasi yang kompleks, yang pada salah satu arah akan menimbulkan tegangan geser yang maksimum. Apabila tegangan geser tersebut melebihi kekuatan bahan benda kerja maka akan terjadi deformasi plastis pada daerah tegangan yang terpengaruh oleh gerakan pahat. Deformasi plastis ini kemudian menggeser dan memutuskan material benda kerja diujung pahat pada suatu bidang geser, sehingga terbentuklah geram (Rochim, 1993). Gambar 2.3 menunjukkan pembentukan geram akibat tegangan geser yang dilakukan pahat terhadap benda kerja yang diambil dari lingkaran Merchant.

Gaya potong adalah gaya yang menimbulkan tegangan geser yang menghasilkan deformasi plastis pada bidang geser. Selama perhitungan teoritik diasumsikan bahwa deformasi material benda kerja pada proses pemotongan terjadi dalam dua dimensi, dan tegangan terdistribusi secara merata pada bidang geser.



Gambar 2.3 (a) Teori Pemotongan Geram (b) Arah Gaya-Gaya Reaksi Pemotongan (Lingkaran Gaya Pemotongan) (c) Analisa Geram (Rochim, 1993)

Berdasarkan analisis geometrik dari lingkaran gaya seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.3 (b), persamaan dari gaya potong teoritis F_v adalah:

dari:

$$F_v = F \cos(\eta - \gamma_0) \quad (2.12)$$

$$F_s = F \cos(\Phi + \eta - \gamma_0) \quad (2.13)$$

maka:

$$F_v = \frac{F_s \cos(\eta - \gamma_0)}{\cos(\Phi + \eta - \gamma_0)} [N] \quad (2.14)$$

F adalah gaya total sedangkan F_s adalah gaya geser yang mendeformasikan material pada bidang geser sehingga melampaui batas elastik. F_s dapat ditentukan dengan menggunakan penampang bidang geser dan tegangan geser yang terjadi, yaitu:

$$F_s = A_{shi} \tau_{shi} [N] \quad (2.15)$$

Dengan:

$$\tau_{shi} = \text{tegangan geser pada bidang geser} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

$$A_{shi} = \text{penampang bidang geser} \\ = A / \sin \Phi [mm^2]$$

$$A = \text{penampang geram sebelum terpotong} \\ = b \cdot h [mm^2]$$

Dengan demikian gaya potong dapat dirumuskan sebagai:

$$F_v = \tau_{shi} \cdot A \cdot \frac{\cos(\eta - \gamma_0)}{\sin \Phi \cos(\Phi + \eta - \gamma_0)} [N] \quad (2.16)$$

Pada proses gurdi yang menggunakan pahat dengan dua mata potong, gaya pemotongan pada salah satu mata potong dapat diuraikan menjadi dua komponen,

yaitu F_v dan F_f seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4. F_v adalah gaya potong, sedangkan F_f adalah gaya makan yang searah dengan kecepatan makan. Selama proses gudi dibutuhkan penekanan yang berfungsi untuk melawan gaya ekstruksi yang cukup besar diujung pahat gudi. Hal ini dilakukan karena kecepatan potong diujung pahat gudi sama dengan nol, sehingga tidak terjadi pemotongan melainkan penekanan pada benda kerja. Penekanan juga dibutuhkan untuk melawan gesekan pada bidang utama bagi kedua mata potong. Berdasarkan Gambar 2.4, persamaan gaya tangensial dapat diturunkan sebagai:

$$F_t = F_v + F_a \text{ [N]} \quad (2.17)$$

Dengan:

$$\begin{aligned} F_v &= \text{gaya potong, seperti pada persamaan (2.16) dengan } A = \frac{(d-d_i)}{2} \cdot \frac{f}{2} \\ &= \tau_{shi} \cdot \frac{(d-d_i)}{2} \cdot \frac{f}{2} \cdot \frac{\cos(\eta - \gamma_0)}{\sin \Phi \cos(\Phi + \eta - \gamma_0)} \text{ [N]} \end{aligned} \quad (2.18)$$

F_a = gaya gesek pada bidang utama, yang tergantung pada gaya gesek spesifik persatuan panjang aktif mata potong (K_f , [N/mm]). Gaya gesek ini dipengaruhi oleh geometri pahat, benda kerja, cairan pendingin dan kondisi pemotongan.

$$= K_f \frac{d-d_i}{2 \sin K_r} \text{ [N]} \quad (2.19)$$

Substitusi persamaan (2.18) dan persamaan (2.19) kedalam persamaan (2.17) menghasilkan persamaan gaya tangensial berikut ini:

$$F_t = \tau_{shi} \cdot \frac{(d-d_i)}{2} \cdot \frac{f}{2} \cdot \frac{\cos(\eta - \gamma_0)}{\sin \Phi \cos(\Phi + \eta - \gamma_0)} + K_f \cdot \frac{d-d_i}{2 \sin K_r} \text{ [N]} \quad (2.20)$$

Dengan:

τ_{shi} = tegangan geser pada bidang geser [N/mm²]

γ_0 = sudut geram

H = sudut gesek

Φ = sudut geser

Torsi yang diperlukan agar pahat potong dapat berputar adalah:

$$M_z = F_t \frac{d-d_i}{2} \text{ [Nm]} \quad (2.21)$$

Gaya tekan yang diperlukan agar proses pemakanan dapat berlangsung adalah:

$$F_z = 2F_f \sin K_r + 2F_{an} \sin K_r + F_e \text{ [N]} \quad (2.22)$$

Dengan:

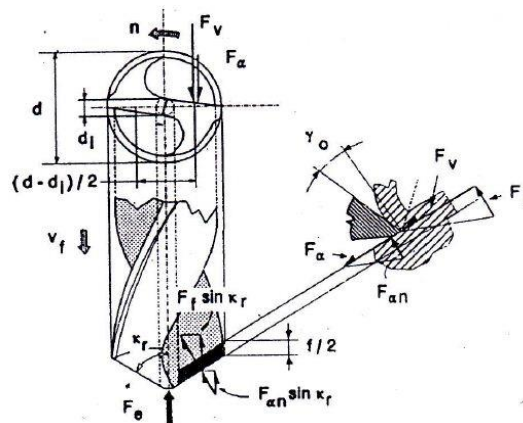
F_z = gaya tekan total untuk dua sisi potong [N]

F_f = gaya makan [N]

$F_{\alpha n}$ = gaya normal pada bidang potong utama, yang tergantung pada gaya normal spesifik persatuan gaya panjang aktif mata potong (K_n , [N/mm]) yang dipengaruhi oleh jenis geometri pahat, benda kerja, cairan pendingin dan kondisi pemotongan.

$$= K_n \frac{d-d_i}{2 \sin K_r} [N] \quad (2.23)$$

F_e = gaya ekstrusi yang terjadi di ujung pahat potong. Sesuai dengan penampang diameter inti dari hasil percobaan, secara umum gaya ini bernilai sekitar 50% sampai 55% dari gaya tekan total [N].



Gambar 2.4 Gaya Pemotongan pada Proses Gurdi (Rochim, 1993)

dengan demikian persamaan gaya tekan total adalah:

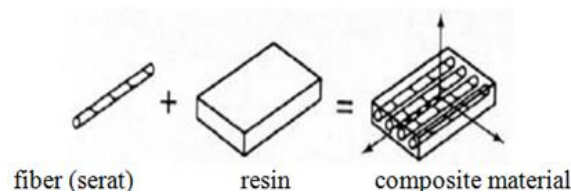
$$F_z = 4 \left(F_v \tan(\eta - \gamma_0) \sin K_r + K_n \frac{d-d_i}{2} \right) [N] \quad (2.24)$$

2.2.4 Material Komposit

2.2.4.1 Pengertian Material Komposit

Material komposit merupakan material yang terdiri dari dua atau lebih bahan yang berbeda yang digabung atau dicampur secara makroskopis menjadi suatu bahan yang berguna (Jones, 1975). Rijswijk dkk. (2001) menjelaskan komposit adalah bahan hibrida yang terbuat dari resin polimer diperkuat dengan

serat, menggabungkan sifat-sifat mekanik dan fisik. Ilustrasi ikatan dan sifat fisik polimer dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Komposisi Komposit (Rijswijk dkk., 2001)

Bahan komposit merupakan bahan gabungan secara makro yang didefinisikan sebagai suatu sistem material yang tersusun dari campuran atau kombinasi dua atau lebih unsur-unsur utama yang secara makro berbeda dalam bentuk dan atau komposisi material yang tidak dapat dipisahkan (Schwartz, 1984). Material komposit mempunyai beberapa keuntungan diantaranya:

1. Bobotnya ringan.
2. Mempunyai kekuatan dan kekakuan yang baik.
3. Biaya produksi murah.
4. Tahan korosi.

Material komposit terdiri dari dua buah penyusun, yaitu bahan pengisi (*filler*) dan matriks. Adapun definisi dari keduanya adalah sebagai berikut:

1. *Filler* adalah bahan pengisi yang digunakan dalam pembuatan komposit, pada umumnya berupa serat atau serbuk. Serat yang sering digunakan pada pembuatan komposit antara lain serat *E-glass*, boron, karbon dan lain sebagainya. Bisa juga dari serat alam antara lain serat kenaf, jute, rami, kantula dan lain sebagainya.
2. Matriks adalah fasa dalam komposit yang mempunyai bagian atau fraksi volume terbesar (dominan). Matriks dalam struktur komposit bisa berasal dari bahan polimer, logam, maupun keramik. Matriks secara umum berfungsi untuk mengikat serat menjadi satu struktur komposit. Fungsi dari matriks dalam komposit antara lain:
 1. Mengikat serat menjadi satu kesatuan struktur.
 2. Melindungi serat dari kerusakan akibat kondisi lingkungan.

3. Mentransfer dan mendistribusikan beban ke serat.
4. Menyumbangkan beberapa sifat seperti, kekakuan, ketangguhan dan tahanan listrik.

Tujuan dibuatnya komposit adalah memperbaiki sifat mekanik atau sifat spesifik tertentu, mempermudah desain yang sulit pada manufaktur, keleluasaan dalam bentuk atau desain yang dapat menghemat biaya produksi dan menjadikan bahan lebih ringan. Komposit yang diproduksi oleh suatu instansi atau pabrik pada umumnya dapat diprediksi sifat mekanik dari bahan komposit berdasarkan bahan matriks dan bahan penguatnya (Callister, 2007). Adapun beberapa sifat mekanik yang dapat diprediksi dari komposit yaitu kekuatan tarik dan kelayakan sebagai material komposit (validitas komposit).

Kekuatan tarik komposit dipengaruhi oleh kekuatan *interface*-nya. Pengujian kekuatan *interface* sangat sulit ditentukan karena prosesnya yang cukup rumit, sehingga hasil pengujian sangat sulit ditentukan karena adanya faktor teknis pembuatan spesimen. Perbedaan campuran unsur matriks dan perbedaan serat juga menghasilkan kekuatan *adhesive* yang berbeda, sehingga tidak jarang serat pada komposit polimer/serat akan putus sebelum terlepas dari matriksnya. Gambar 2.6 merupakan diagram kekuatan tarik yang terjadi pada komposit berpenguat serat (*fiber reinforced composite*). Secara keseluruhan sifat komposit ini dipengaruhi oleh:

1. Sifat dari serat/penguat.
2. Sifat dari matriks penyusun komposit.
3. Fraksi volume serat dan matriks penyusun.
4. Orientasi serat pada komposit tersebut.

Adapun besarnya kekuatan tarik yang dihasilkan oleh komposit polimer/serat dapat diprediksi dengan menggunakan persamaan 2.25 (Callister, 2007).

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad (2.25)$$

Dengan:

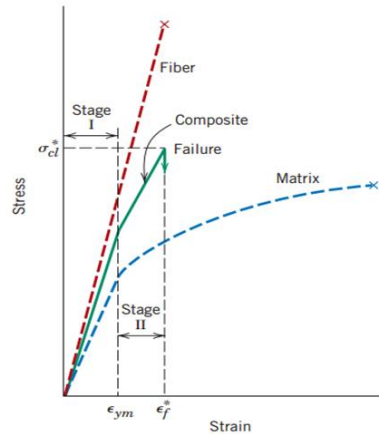
σ_c = kekuatan tarik komposit [MPa]

σ_m = kekuatan tarik matriks [MPa]

σ_f = kekuatan tarik penguat [MPa]

V_m = fraksi volume matriks

V_f = fraksi volume penguat



Gambar 2.6 Diagram Uji Tarik pada FRP Komposit (Callister, 2007)

Persamaan ini dapat digunakan untuk mengetahui sejauh mana besarnya kekuatan tarik yang dihasilkan oleh komposit berdasarkan matriks dan penguat penyusunnya

2.2.4.2 Klasifikasi Material Komposit

Berdasarkan matriks yang digunakan, komposit dapat dikelompokkan atas (Callister, 2007):

1. *Ceramic matrix composite* (CMC)

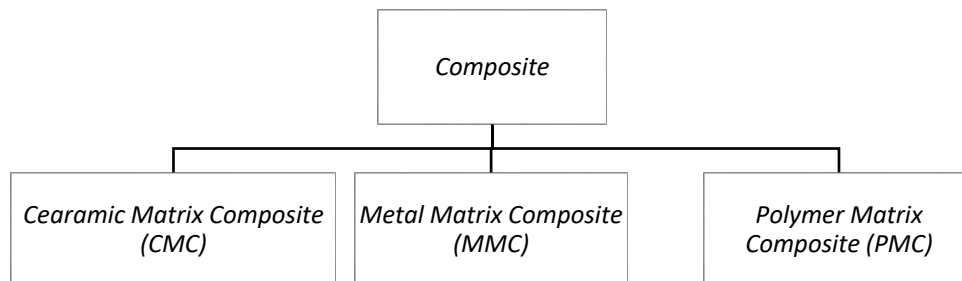
CMC merupakan material dua fasa dengan satu fasa berfungsi sebagai penguat dan satu fasa sebagai matriks, dimana matriksnya terbuat dari keramik. Penguat yang umum digunakan pada CMC adalah oksida, karbida dan nitrida.

2. *Metal matrix composite* (MMC)

MMC adalah salah satu jenis komposit yang memiliki matriks logam. Awal mulanya yang diteliti adalah *continous filamen* MMC yang digunakan pada industri penerbangan.

3. *Polymer matrix composite* (PMC)

PMC merupakan matriks yang paling umum digunakan pada material komposit karena memiliki sifat yang lebih tahan terhadap korosi dan bobot yang ringan. Matriks polimer terbagi menjadi dua, yaitu termoset dan termoplastik. Perbedaan dari keduanya adalah polimer termoset tidak dapat didaur ulang, sedangkan termoplastik dapat didaur ulang sehingga lebih banyak digunakan. Jenis-jenis termoplastik yang umum digunakan adalah *polypropylene* (PP), *polystyrene* (PS) dan *polyethylene* (PE). Bagan pengelompokan komposit berdasarkan matriks yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Klasifikasi Komposit Berdasarkan Matriksnya

Berdasarkan strukturnya komposit dibedakan atas (Callister, 2007):

1. *Particulate composite materials* (komposit partikel)

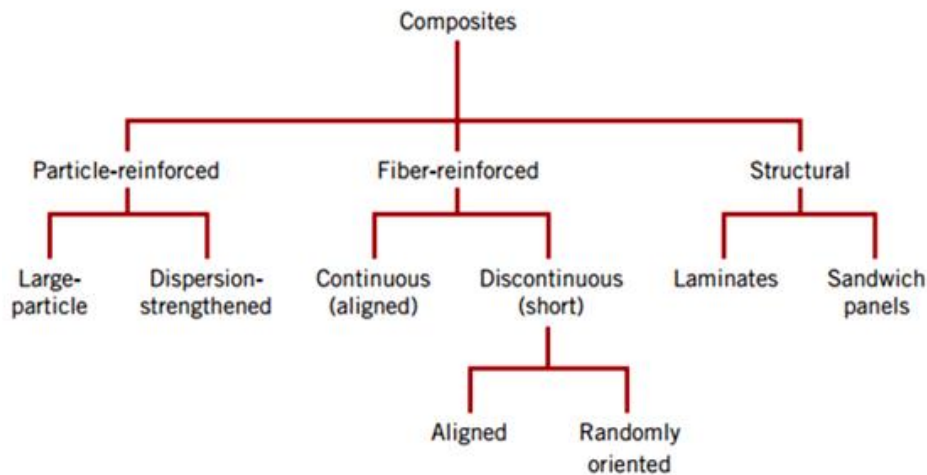
Merupakan *jenis* komposit yang menggunakan partikel/butiran sebagai *filler* (pengisi). Partikel berupa logam atau non logam dapat digunakan sebagai *filler*.

2. *Fiber composite materials* (komposit serat)

Komposit yang terdiri dari dua komponen penyusun yaitu matriks dan serat.

3. *Structural composite materials* (komposit berlapis)

Komposit yang terdiri dari minimal dua material berbeda yang direkatkan bersama-sama. Proses pelapisan dilakukan dengan mengkombinasikan aspek terbaik dari masing-masing lapisan untuk memperoleh bahan yang berguna. Pembagian komposit berdasarkan strukturnya dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Klasifikasi Komposit Berdasarkan Strukturnya (Callister, 2007).

2.2.4.3 Fiber Reinforced Composite Material

Material komposit yang dibahas dalam penelitian ini adalah jenis *fiber reinforced* yaitu komposit yang terdiri dari serat-serat sebagai penguat yang diikat dengan matriks. Tujuan dibuatnya material ini adalah agar material memiliki kekuatan dan modulus spesifik yang tinggi (Callister, 2007). Bahan serat yang sering digunakan sebagai penguat adalah gelas, aramid dan karbon (*graphite*).

Tabel 2.1 Sifat-Sifat Mekanik dari Bahan Serat Fiber dan Wire

Fiber or Wire	Density (Kn/m ³)	Tensile Strength (GPa)	S (km)	Tensile Stifness (Gpa)	E (mm)
Aluminium	26,3	0,62	24	73	2,8
Titanium	46,1	1,9	41	115	2,5
Steel	76,6	4,1	54	207	2,7
E-Glass	25	3,4	136	72	29
S-Glass	25,5	4,8	197	86	3,5
Carbon	13,8	1,7	123	190	14
Beryllium	18,2	1,7	93	300	16
Boron	25,2	3,4	137	400	16
Graphite	13,8	1,7	123	250	18

Sumber: Jones, 1975

Material dalam bentuk serat mempunyai kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan material dalam bentuk *bulk* karena serat mempunyai ukuran yang mendekati ukuran kristal, sehingga dislokasi yang terjadi lebih kecil dibandingkan dislokasi pada material dalam bentuk *bulk*. Matriks yang digunakan sebagai

pengikat serat juga dapat berfungsi untuk mengalirkan tegangan dari satu serat ke serat lainnya, selain itu juga berfungsi untuk meneruskan tegangan pada serat yang putus. Material matriks memiliki kekuatan yang lebih rendah dibandingkan material serat, karena fungsi utamanya hanya sebagai pengikat serat. Sifat-sifat mekanik dari bahan serat fiber dan *wire* ditunjukkan pada Tabel 2.1.

2.2.4.4 Polymer Matrix Composite

Polymer matrix composite (PMC) mengandung polimer resin sebagai matriks dengan serat fiber sebagai penguat. Material ini banyak digunakan di berbagai aplikasi komposit karena beberapa kelebihan, yaitu biaya pembuatan yang lebih rendah dan dapat dibuat dengan produksi misal. Polimer memiliki sifat-sifat antara lain ketangguhan yang baik, ketahanan simpan yang baik, siklus fabrikasi yang dapat dipersingkat, kemampuan mengikuti bentuk dan lebih ringan dibandingkan dengan jenis matriks yang lain. Jenis polimer yang banyak digunakan adalah (Callister, 2007):

1. Termoplastik

Termoplastik adalah plastik yang dapat dilunakkan berulang kali (*recycle*) dengan menggunakan panas. Termoplastik merupakan polimer yang akan menjadi keras apabila didinginkan. Termoplastik meleleh pada suhu tertentu, melekat mengikuti perubahan suhu dan mempunyai sifat dapat balik (*reversibel*) kepada sifat aslinya yaitu kembali mengeras bila didinginkan.

2. Termoset

Termoset tidak dapat mengikuti perubahan suhu (*irreversibel*). Bila sekali pengerasan telah terjadi, maka bahan tidak dapat dilunakkan kembali. Pemanasan yang tinggi tidak akan melunakkan termoset, melainkan akan membentuk arang dan terurai. Plastik jenis termoset tidak begitu baik dalam proses daur ulang karena selain sulit penanganannya, volumenya juga jauh lebih sedikit (sekitar 10%) dari volume jenis plastik yang bersifat termoset.

Beberapa klasifikasi PMC berdasarkan jenis penguatnya antara lain (Callister, 2007):

1. *Glass fiber reinforced polymer (GFRP) composites*
2. *Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites*
3. *Aramid fiber reinforced polymer composites*

Perbandingan ketiga jenis komposit dengan matriks polimer diatas berdasarkan propertinya dapat dilihat pada Gambar 2.9.

<i>Property</i>	<i>Glass (E-glass)</i>	<i>Carbon (High Strength)</i>	<i>Aramid (Kevlar 49)</i>
Specific gravity	2.1	1.6	1.4
Tensile modulus			
Longitudinal [GPa (10 ⁶ psi)]	45 (6.5)	145 (21)	76 (11)
Transverse [GPa (10 ⁶ psi)]	12 (1.8)	10 (1.5)	5.5 (0.8)
Tensile strength			
Longitudinal [MPa (ksi)]	1020 (150)	1240 (180)	1380 (200)
Transverse [MPa (ksi)]	40 (5.8)	41 (6)	30 (4.3)
Ultimate tensile strain			
Longitudinal	2.3	0.9	1.8
Transverse	0.4	0.4	0.5

Gambar 2.9 Perbandingan Properti Komposit dengan Matriks Polimer untuk 3 Jenis Serat Penguat (Gelas, Karbon Dan Aramid) pada Fraksi Volume Fiber 0,60 (Callister, 2007).

Ketiga jenis fiber tersebut merupakan jenis fiber yang paling sering digunakan sebagai penguat pada material komposit dengan matriks polimer. Selain ketiga jenis fiber diatas beberapa jenis fiber juga digunakan antara lain boron, karbida silikon dan oksida aluminium.

2.2.5 Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

Filler (penguat) yang digunakan pada komposit jenis ini adalah serat fiber yaitu *carbon*, sedangkan matriks yang digunakan yaitu polimer *epoxy*. Adanya dua penyusun material komposit ini menimbulkan beberapa daerah dan istilah penyebutannya. *Interphase* yaitu pelekatan antar dua penyusun dan *interface* yaitu permukaan fasa yang berbatasan dengan fasa lain. Secara struktur mikro material komposit tidak merubah material pembentuknya, tetapi secara keseluruhan material komposit berbeda dengan material pembentuknya karena terjadi ikatan antar permukaan antara matriks dan *filler*. Ikatan antar permukaan ini terjadi karena adanya gaya adhesi dan kohesi (Callister, 2007). Sifat maupun karakteristik dari

komposit ditentukan oleh beberapa hal, antara lain material yang menjadi penyusun komposit, bentuk dan penyusunan struktural dari penyusun dan interaksi antar penyusun. Sifat mekanik dari material CFRP ditunjukkan pada Gambar 2.10.

Mechanical Properties	Test Condition			
	-65°F (-55°C)	Room Temp.	160°F (71°C)	180°F (82°C) Wet
0° Tensile Properties				
Strength, ksi (MPa)	75 – 100 (517 – 689)	85 – 100 (586 – 689)	85 – 100 (586 – 689)	50 – 75 (345 – 517)
Modulus, Msi (GPa)	8 – 10 (55 – 69)	9 – 11 (62 – 76)	8 – 10 (55 – 69)	6 – 8 (41 – 55)
Failure Strain, %	0.8 – 1.0	–	–	–
0° Compressive Properties				
Strength, ksi (MPa)	–	85 – 100 (586 – 689)	85 – 100 (586 – 689)	75 – 90 (517 – 612)
Modulus, Msi (GPa)	7 – 9 (48 – 62)	7 – 9 (48 – 62)	–	–
0° Flexural Properties				
Strength, ksi (MPa)	–	110 – 130 (758 – 896)	–	50 – 75 (345 – 517)
Modulus, Msi (GPa)	–	8 – 10 (55 – 59)	–	6 – 8 (41 – 55)
Interlaminar Shear Properties				
Strength, ksi (MPa)	10 – 13 (69 – 90)	8 – 12 (55 – 83)	8 – 10 (55 – 69)	8 – 10 (55 – 69)

Gambar 2.10 Sifat Mekanik Material Komposit *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) (Cyttec, 2016)

2.2.6 Delaminasi

Delaminasi adalah terkelupasnya lapisan tipis pada permukaan benda kerja dan merupakan salah satu jenis kerusakan pada material komposit yang timbul pada sisi masuk (*peel up delamination*) maupun sisi keluar (*push out delamination*) saat penggurdian. Delaminasi dikenal sebagai sifat kegagalan matriks yang dominan pada komposit yang berlapis-lapis (*laminate*). Faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya delaminasi adalah adanya pembebanan yang berulang-ulang pada benda kerja, tegangan interlaminar yang tinggi pada sudut-sudutnya dan konsentrasi tegangan pada lokasi retak atau kerusakan lain pada laminat.

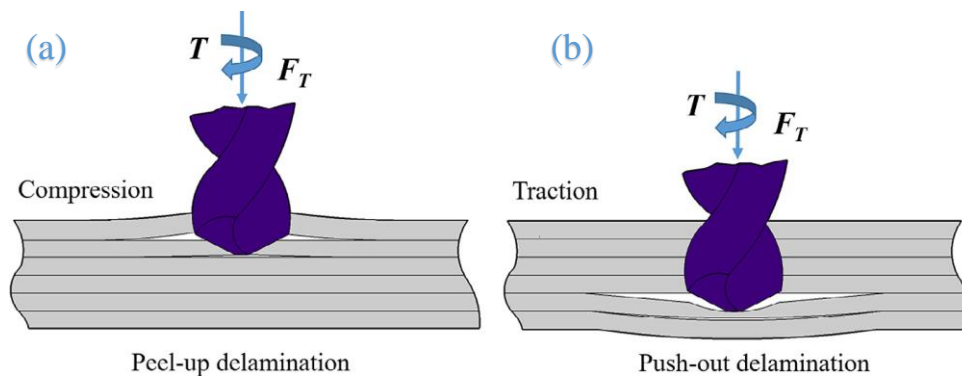
Delaminasi pada penggurdian material komposit ada 2 jenis, yaitu *peel up* dan *push out delamination*. *Peel up delamination* terjadi di sekitar sisi masuk/permukaan atas lubang hasil penggurdian seperti ditunjukkan Gambar 2.11 (a). Ketika tepi potong pahat menyentuh lapisan komposit, maka menghasilkan gaya kupas yang memisahkan lapisan satu dengan lapisan yang lain melalui kemiringan *flute* pahat sehingga membentuk zona delaminasi di sekitar sisi masuk lubang. *Push out delamination* terjadi di sekitar sisi keluar/permukaan bawah lubang hasil penggurdian seperti ditunjukkan Gambar 2.11 (b). Ketika pahat

mendekati sisi keluar lubang, lapisan di bawah pahat yang belum terpotong menjadi lebih rentan terhadap deformasi akibat ketebalannya menurun, pada saat lapisan yang belum terpotong dibebani gaya tekan yang melebihi kekuatan ikatan antar lapisan, maka timbul *push out delamination* di sisi keluar lubang penggurdian.

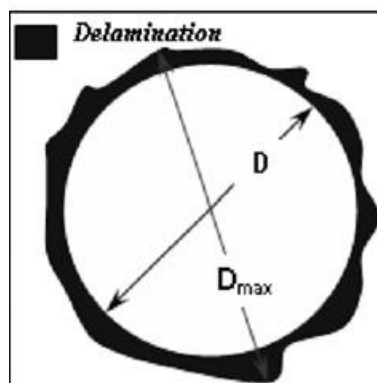
Metode umum yang digunakan untuk mengukur besarnya delaminasi pada hasil penggurdian komposit adalah dengan mencari faktor delaminasi (F_d) (Palanikumar., 2011):

$$F_d = \frac{D_{\max}}{D_{\text{nom}}} \quad (2.26)$$

D_{\max} dan D_{nom} merupakan diameter maksimum pada delaminasi yang diamati dan diameter lubang nominal yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.11 Mekanisme Delaminasi pada Komposit Laminat (a). *Peel Up Delamination* (b) *Push Out Delamination* (Karimi dkk., 2017)



Gambar 2.12 Ilustrasi dari Skema Pengukuran Faktor Delaminasi Skematik pada Spesimen Benda Uji (Palanikumar, 2011)

2.2.7 Metode Prediksi *Backpropagation Neural Network* (BPNN)

Backpropagation Neural Network adalah salah satu dari jenis *Artificial Neural network* (ANN) yang merupakan sistem pemroses informasi yang memiliki karakteristik mirip dengan jaringan syaraf biologi. ANN dibentuk sebagai generalisasi model matematika dari jaringan syaraf biologi (Siang, 2009), dengan asumsi bahwa:

1. Pemrosesan informasi terjadi pada banyak elemen sederhana (*neuron*).
2. Sinyal dikirimkan diantara *neuron-neuron* melalui penghubung-penghubung.
3. Penghubung antar *neuron* memiliki bobot yang akan memperkuat atau memperlemah sinyal.
4. Untuk menentukan *output*, setiap *neuron* menggunakan fungsi aktivasi yang diterapkan pada jumlahan *input* yang diterima. Besarnya *output* ini selanjutnya dibandingkan dengan suatu batas ambang.

Penerapan metode *soft computing neural network* ditentukan oleh 3 hal, yaitu:

1. Pola hubungan antar *neuron* yang disebut arsitektur jaringan.
2. Metode untuk menentukan bobot penghubung yang disebut metode *training/learning/algoritma*.
3. Fungsi aktivasi.

Beberapa model jaringan arsitektur yang sering digunakan dalam ANN, adalah jaringan model *hebb*, *perceptron*, *adaline* dan *backpropagation*. *Backpropagation neural network* (BPNN) dibentuk dengan membuat generalisasi aturan pelatihan dalam model Widrow-Hoff dengan cara menambahkan *layer* tersembunyi. Kata *backpropagation* merujuk pada cara bagaimana gradien perubahan bobot dihitung (Siang, 2009).

BPNN terdiri dari *input layer*, *hidden layer* dan *output layer*, dimana masing-masing *layer* memiliki sejumlah *neuron* yang saling terhubung antar *layer* dan memiliki bobot. Hasil (*output*) BPNN didasarkan pada pengalaman saat melakukan proses pelatihan (*training*). Proses pelatihan BPNN diawali dengan memberikan nilai bobot awal secara random. Informasi yang sudah diketahui hasilnya dimasukkan ke dalam *neuron* pada *input layer*. Bobot-bobot ini digunakan

untuk mengingat pola informasi yang telah diberikan dan diatur secara terus menerus sampai diperoleh hasil yang diharapkan. Tujuan pelatihan BPNN adalah untuk mencapai kemampuan memanggil kembali secara sempurna sebuah pola yang telah dipelajari, sehingga menghasilkan nilai *output* yang bisa diterima terhadap pola-pola yang serupa yang disebut sebagai generalisasi.

Hal yang mempengaruhi kinerja pelatihan BPNN adalah penentuan jaringan arsitektur BPNN berupa konfigurasi *hidden layer* serta jumlah *neuron* dan algoritma pembelajaran. Tidak ada teori yang dengan pasti dapat dipakai. Tetapi secara praktis dicoba jaringan arsitektur yang kecil terlebih dahulu, misalnya terdiri dari satu *layer* tersembunyi. Jika gagal (ditunjukkan dengan nilai error yang tidak mengecil dalam *epoch* yang besar), maka jaringan diperbesar dengan menambahkan *neuron* atau bahkan menambah *layer* tersembunyi (Siang, 2009).

Perangkat lunak Matlab dapat digunakan untuk melakukan prediksi dengan algoritma BPNN, sehingga mampu melakukan iterasi pada performansi algoritma pelatihannya. Langkah-langkah yang harus dilakukan untuk memprogram BPNN adalah sebagai berikut (Siang, 2009):

1. Inisialisasi Jaringan

Membuat inisialisasi jaringan merupakan langkah pertama yang harus dilakukan untuk pemrograman BPNN. Perintah (*script*) yang dipakai untuk membuat jaringan adalah “newff” yang formatnya seperti berikut:

`net = newff(PR [S1 S2...SN], {TF1 TF2...TFN}, BTF, BLF, PF)`

Dengan:

`net` = jaringan *backpropagation* yang terdiri dari *n layer*

`PR` = matriks ordo $R \times 2$ yang berisi nilai minimum dan maksimum *R* buah elemen masukannya

`Si` = jumlah unit pada *layer* ke-*i*, dengan $i = 1, 2, \dots, n$

`TFi` = fungsi aktivasi yang dipakai pada *layer* ke-*i*, dengan $i = 1, 2, \dots, n$

`BTF` = fungsi pelatihan jaringan

`BLF` = fungsi perubahan bobot/bias

`PF` = fungsi perhitungan error (*default* = MSE).

Ada beberapa fungsi aktivasi yang sering digunakan dalam pelatihan BPNN, yaitu:

- a) tansig (*sigmoid bipolar*), fungsi ini merupakan *default* yang dipakai. Fungsi *sigmoid bipolar* memiliki interval (-1, 1).

$$\text{Persamaan fungsi tansig adalah: } f(\text{net}) = \frac{2}{1+e^{-\text{net}}} - 1 \quad (2.27)$$

- b) logsig (*sigmoid biner*), fungsi ini memiliki bentuk yang sama seperti *sigmoid bipolar*, akan tetapi interval berbeda yaitu (0, 1).

$$\text{Persamaan fungsi logsig adalah: } f(\text{net}) = \frac{1}{1+e^{-\text{net}}} \quad (2.28)$$

- c) purelin adalah fungsi identitas.

$$\text{Persamaannya adalah: } f(\text{net}) = \text{net} \quad (2.29)$$

2. Inisialisasi Bobot

Nilai bobot dan bias awal dengan bilangan acak akan diberikan oleh Matlab setiap kali jaringan *backpropagation* dibentuk. Setiap kali membentuk jaringan baru, maka nilai bobot dan bias akan berubah. Apabila menginginkan memberi nilai tertentu, maka dapat dilakukan dengan cara memberi nilai pada `net.IW`, `net.LW` dan `net.b` (*script* inisialisasi bobot dan bias).

3. Simulasi Jaringan

Tujuan dari simulasi jaringan *backpropagation* adalah untuk menghitung keluaran jaringan berdasarkan arsitektur jaringan, pola masukan dan fungsi aktivasi yang digunakan. Format perintah yang digunakan adalah “sim”.

4. Pelatihan Standar *Backpropagation*

Pelatihan *backpropagation* dilakukan untuk melatih jaringan yang dipakai dengan menggunakan perintah “train”. Tujuannya adalah untuk meminimumkan kuadrat kesalahan rata-rata atau *mean square error* (MSE).

Ada 3 fase pelatihan *backpropagation* yang terdiri dari fase propagasi maju, fase propagasi mundur dan fase perubahan nilai bobot untuk menurunkan nilai eror yang terjadi (Siang, 2009).

- a) Fase Propagasi maju

Selama propagasi maju, unit masukan (x_i) dipropagasikan ke *hidden layer* dengan menggunakan fungsi aktivasi yang sudah ditentukan. Hasil keluaran dari setiap unit (z_j) tersebut kemudian dipropagasikan maju ke *hidden layer* di atasnya dengan menggunakan fungsi aktivasi yang sudah ditentukan. Proses ini berlangsung secara berulang-ulang hingga menghasilkan keluaran jaringan (y_k). Selanjutnya, hasil dari keluaran jaringan (y_k) dibandingkan dengan nilai target yang ingin dicapai. Nilai selisih antara $t_k - y_k$ adalah nilai kesalahan yang terjadi. Apabila nilai kesalahan masih lebih besar dari batas toleransinya, maka nilai bobot dari setiap baris dalam jaringan akan dimodifikasi untuk mengurangi nilai kesalahan yang terjadi.

b) Propagasi mundur

Berdasarkan nilai kesalahan $t_k - y_k$, dihitung nilai faktor δ_k ($k=1, 2, \dots, m$) yang dipakai untuk mendistribusikan nilai kesalahan di keluaran y_k ke semua *hidden layer* yang terhubung langsung dengan y_k . Nilai faktor δ_k juga dipakai untuk mengubah bobot garis yang berhubungan langsung dengan unit keluaran. Nilai faktor δ_j pada setiap unit di *hidden layer* dihitung dengan cara yang sama sebagai dasar perubahan bobot semua garis yang berasal dari *hidden layer* di bawahnya. Hal ini dilakukan berulang-ulang hingga faktor δ di *hidden layer* yang berhubungan langsung dengan unit masukan dihitung.

c) Perubahan bobot

Apabila semua faktor δ telah dihitung, maka bobot semua garis dimodifikasi bersamaan. Perubahan bobot suatu garis didasarkan atas faktor δ neuron di layer atasnya. Sebagai contoh, perubahan bobot garis yang menuju ke *layer* keluaran didasarkan atas δ_k yang ada di unit keluaran.

Ketiga fase di atas diulang terus menerus hingga kondisi pemberhentian dipenuhi. Umumnya kriteria pemberhentian yang sering digunakan adalah jumlah iterasi atau MSE. Iterasi akan dihentikan jika jumlah iterasi yang dilakukan sudah melebihi jumlah maksimum iterasi yang ditetapkan, atau jika MSE yang terjadi sudah lebih kecil dari batas toleransi yang diijinkan.

5. Kriteria pemberhentian pelatihan BPNN

Ada beberapa kriteria pemberhentian untuk parameter pelatihan BPNN yang dapat di atur sebelum dilakukan pelatihan adalah (Siang, 2009):

a) `net.trainParam.epochs`

Kriteria pemberhentian ini dipakai untuk menentukan jumlah *epoch* maksimum pelatihan backpropagation. Iterasi akan berhenti jika jumlah *epoch* pelatihan lebih besar dari batas maksimum *epoch* yang ditentukan.

b) `net.trainParam.time`

Kriteria pemberhentian ini dipakai untuk membatasi lama pelatihan. Proses iterasi akan berhenti jika lama pelatihan telah melewati batas yang ditentukan.

c) `net.trainParam.goal`

Kriteria pemberhentian ini dipakai untuk menentukan batas nilai MSE. Proses iterasi akan berhenti jika nilai MSE sudah lebih kecil dari batas nilai MSE yang ditentukan.

d) `net.trainParam.min_grad`

Kriteria pemberhentian ini dipakai untuk menentukan nilai perbedaan minimum dari bobot dan bias. Proses iterasi akan berhenti apabila nilai perbedaan bobot dan bias pada iterasi *i* dan *i-1* adalah sama.

e) `net.trainParam.max_fail`

Kriteria pemberhentian ini dipakai untuk menentukan nilai maksimum kegagalan.

Ada juga beberapa parameter pelatihan untuk laju pembelajaran yang dapat kita atur sebelum pelatihan dijalankan agar dapat memperoleh hasil yang lebih optimal, yaitu:

a) `net.trainParam.lr`

Parameter ini dipakai untuk menentukan laju pembelajaran (*learning rate*). Nilai *default learning rate* adalah sebesar 0,01. Bila nilai *rate* tersebut semakin besar dari pada nilai *default learning rate* maka proses pelatihan berjalan cepat, namun ada kemungkinan nilai yang

diperoleh adalah nilai optimum lokal. Nilai *learning rate* yang dipilih terlalu kecil akan mengakibatkan hasil optimasi BPNN menjadi tidak stabil dan waktu perhitungan menjadi lama.

b) `net.trainParam.show`

Parameter ini dipakai untuk menampilkan setiap perulangan atau iterasi sebanyak nilai “*show*” yang ditentukan.

6. Pemilihan Fungsi Pelatihan BPNN

Dalam pelatihan menggunakan *backpropagation*, seringkali prosesnya terlalu lambat sehingga perlu beberapa modifikasi yang harus dilakukan, yaitu dengan cara mengganti fungsi pelatihannya. Beberapa metode yang digunakan sebagai modifikasi adalah (Siang, 2009):

a) Metode parameter *learning rate* (`traingda`, `traingdx`)

Learning rate diubah-ubah besarnya selama proses pelatihan, akan dapat proses pelatihan itu sendiri. Jika eror lebih besar dibandingkan dengan eror sebelumnya, maka *learning rate* diturunkan. Begitupun jika terjadi sebaliknya, maka *learning rate* diperbesar.

b) *Resilient Backpropagation* (`trainrp`)

Resilient Backpropagation membagi arah dan perubahan bobot menjadi 2 bagian yang berbeda. Saat menggunakan metode penurunan tercepat, yang diambil hanya arahnya saja. Besarnya perubahan bobot dilakukan dengan cara acak.

2.2.8 Preprocessing data eksperimen

Preprocessing data eksperimen digunakan untuk normalisasi data eksperimen yang memiliki satuan dan interval yang berbeda-beda menjadi data yang non-dimensional dengan interval diantara [-1, 1]. Rumus untuk melakukan preprocessing data eksperimen adalah sebagai berikut (Yin, 2011):

$$p_n = \frac{2(p - \min(p))}{(\max(p) - \min(p))} - 1 \quad (2.30)$$

Dengan:

p = data parameter *input* dan respon dari eksperimen

p_n = data hasil normalisasi parameter *input* dan respon eksperimen

2.2.9 Penghitungan Hasil Prediksi dengan BPNN

Penghitungan nilai persen eror dari selisih data eksperimen dengan hasil prediksi BPNN adalah sebagai berikut (Rong, 2015):

$$Error = \frac{\text{Eksperimen} - \text{BPNN}}{\text{Eksperimen}} \times 100\% \quad (2.31)$$

Dengan:

Eksperimen = nilai parameter respon dari eksperimen

BPNN = nilai hasil prediksi BPNN

Penghitungan nilai *mean square error* (MSE) dari data eksperimen dengan hasil prediksi BPNN adalah sebagai berikut (Rong, 2015):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.32)$$

Dengan:

x_i = hasil prediksi BPNN

\bar{x} = nilai rata-rata hasil prediksi BPNN

2.2.10 Metode Optimasi Particle Swarm Optimization (PSO)

Particle Swarm Optimization (PSO) meniru sosial perilaku sekawanan burung atau ikan pada habitat alami. Perilaku sosial terdiri dari tindakan individu dan pengaruh dari individu-individu lain dalam suatu kelompok. Kata partikel menunjukkan, misalnya, seekor burung dalam kawanan burung. Setiap individu atau partikel berperilaku dengan cara menggunakan kecerdasannya (*intelligence*) sendiri dan juga dipengaruhi perilaku kelompok kolektifnya. Saat satu partikel atau seekor burung menemukan jalan yang tepat atau pendek menuju ke sumber makanan, sisa kelompok yang lain juga akan dapat segera mengikuti jalan tersebut meskipun lokasi mereka jauh di kelompok tersebut.

Kawanan dalam PSO diasumsikan mempunyai ukuran tertentu dengan setiap partikel posisi awalnya terletak di suatu lokasi yang acak dalam ruang

multidimensi. Setiap partikel diasumsikan memiliki dua karakteristik yaitu posisi dan kecepatan. Setiap partikel bergerak dalam ruang/*space* tertentu dan mengingat posisi terbaik yang pernah dilalui atau ditemukan terhadap sumber makanan atau nilai fungsi objektif. Setiap partikel menyampaikan informasi atau posisi terbaiknya kepada partikel yang lain, kemudian menyesuaikan posisi dan kecepatan masing-masing berdasarkan informasi yang diterima mengenai posisi tersebut. Sebagai contoh, misalnya perilaku burung-burung dalam kawanan burung. Meskipun setiap burung mempunyai keterbatasan dalam hal kecerdasan, pada umumnya ia akan mengikuti kebiasaan seperti berikut:

1. Ketika seekor burung mendekati target atau makanan, setiap burung secara cepat mengirim informasi kepada burung-burung yang lain dalam kawanan tertentu.
2. Burung yang lain akan mengikuti arah menuju ke makanan tetapi tidak secara langsung.
3. Ada komponen yang tergantung pada pikiran setiap burung, yaitu memorinya tentang apa yang sudah dilewati pada waktu sebelumnya.

Pencarian solusi pada algoritma PSO ini dilakukan oleh suatu populasi yang terdiri dari beberapa partikel. Populasi dibangkitkan secara acak dengan batasan nilai terkecil dan terbesar. Setiap partikel merepresentasikan posisi atau solusi dari permasalahan yang dihadapi. Setiap partikel melakukan pencarian solusi yang optimal dengan melintasi ruang pencarian (*search space*). Hal ini dilakukan dengan cara setiap partikel melakukan penyesuaian terhadap posisi terbaik dari partikel tersebut (*personal best*) dan penyesuaian terhadap posisi partikel terbaik dari seluruh kawanan (*global best*) selama melintasi ruang pencarian. Penyebaran pengalaman atau informasi terjadi di dalam partikel itu sendiri dan juga diantara suatu partikel dengan partikel terbaik dari seluruh kawanan selama proses pencarian solusi. Proses pencarian kemudian dilakukan untuk mencari posisi terbaik untuk setiap partikel dalam sejumlah iterasi tertentu sampai didapatkan posisi yang relatif sama atau mencapai batas iterasi yang telah ditetapkan. Setiap solusi yang direpresentasikan oleh posisi partikel, akan dievaluasi performansinya pada setiap iterasi dengan cara memasukkan solusi tersebut kedalam *fitness function*.

Setiap partikel diperlakukan seperti sebuah titik pada suatu dimensi ruang tertentu. Terdapat dua faktor yang memberikan karakter terhadap status partikel pada ruang pencarian yaitu posisi partikel dan kecepatan partikel (Kennedy dan Eberhart, 1995).

Berikut merupakan formulasi matematika yang menggambarkan posisi dan kecepatan partikel pada suatu dimensi ruang tertentu:

$$x_j(i) = x_1(1), x_2(1), \dots, x_{jN}(i) \quad (2.33)$$

$$v_j(i) = v_1(1), v_2(1), \dots, v_{jN}(i) \quad (2.34)$$

Dengan:

- x = posisi partikel
- v = kecepatan partikel
- i = iterasi ke- i
- j = indeks partikel
- N = jumlah partikel

Persamaan untuk mekanisme pembaruan status partikel adalah sebagai berikut (Kennedy dan Eberhart, 1995):

$$v_j(i) = v_j(i - 1) + c_1 r_1 (P_{best,j} - x_j(i - 1)) + c_2 r_2 (G_{best} - x_j(i - 1)) \quad (2.35)$$

$$x_j(i) = v_j(i) + x_j(i - 1) \quad (2.36)$$

Dengan:

- $j = 1, 2, \dots, N$ merepresentasikan jumlah partikel
- Obj_i = respon dari eksperimen yaitu gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar.
- $P_{best,j} = P_{best,1}, P_{best,2}, \dots, P_{best,2}$ merepresentasikan *personal best* dari partikel ke- j
- G_{best} = merepresentasikan *global best* dari seluruh kawan.
- $c_1, c_2 = learning factor$
- r_1, r_2 = konstanta berupa bilangan random yang bernilai antara 0 sampai 1.

Persamaan (2.35) digunakan untuk menghitung kecepatan partikel yang baru berdasarkan kecepatan sebelumnya, jarak antara posisi saat ini dengan posisi terbaik partikel (*personal best*) dan jarak antar posisi saat ini dengan posisi terbaik

kawanan (*global best*). Partikel kemudian berpindah menuju posisi yang baru berdasarkan persamaan (2.36). Algoritma PSO ini dijalankan dengan sejumlah iterasi tertentu hingga mencapai kriteria pemberhentian, sehingga akan didapatkan solusi yang terletak pada *global best*.

Persamaan ini akan disimulasikan dalam ruang dengan dimensi tertentu dengan sejumlah iterasi, sehingga di setiap iterasi posisi partikel akan semakin mengarah ke target yang dituju (minimalisasi atau maksimalisasi nilai fungsi). Hal ini dilakukan hingga maksimum iterasi dicapai atau tercapainya kriteria pemberhentian yang lain. Algoritma PSO meliputi langkah-langkah sebagai berikut:

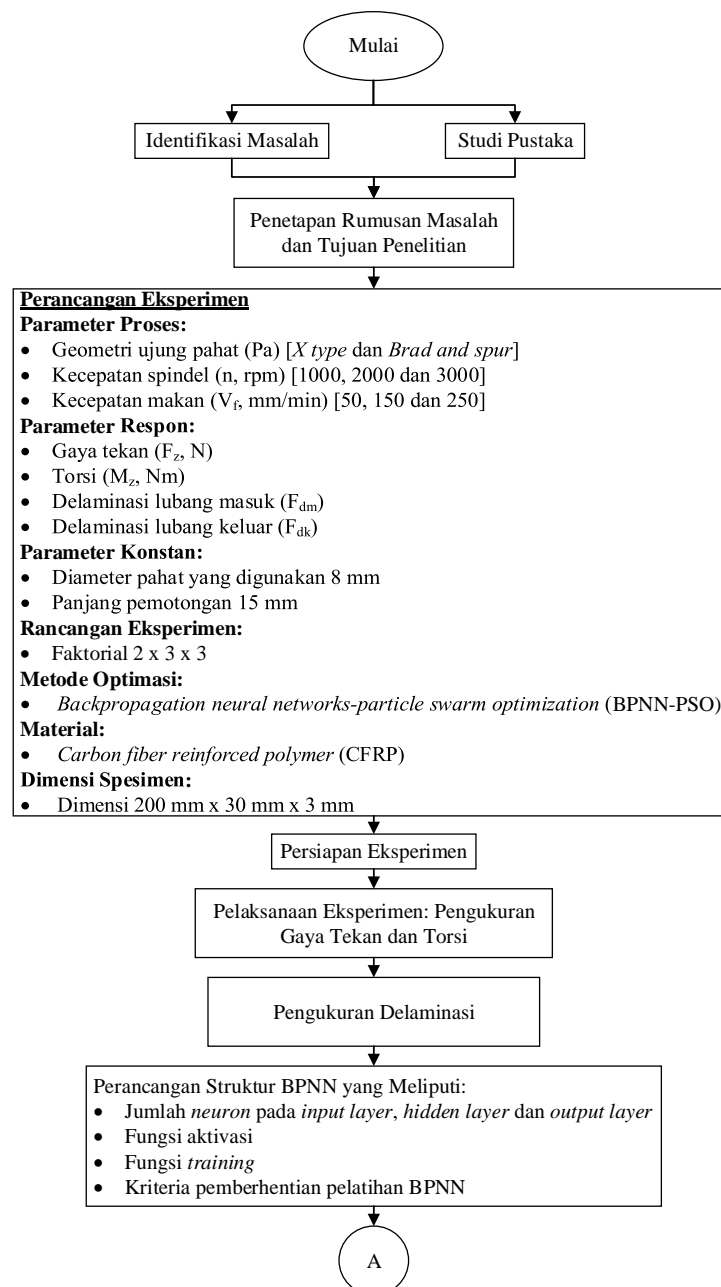
1. Bangkitkan posisi awal sejumlah partikel beserta kecepatan awalnya secara random.
2. Evaluasi nilai *fitness* dari masing-masing partikel berdasarkan posisinya.
3. Tentukan partikel dengan *fitness* terbaik dan tetapkan sebagai *Gbest*. Untuk setiap partikel, tentukan nilai *Pbest* awal sama dengan posisi awal.
4. Menggunakan *Pbest* dan *Gbest* yang ada untuk memperbarui kecepatan setiap partikel dengan menggunakan persamaan (2.33). Setelah kecepatan baru didapatkan, perbarui posisi setiap partikel menggunakan persamaan (2.34).
5. Evaluasi nilai *fitness* dari setiap partikel.
6. Tentukan partikel dengan nilai *fitness* terbaik dan tetapkan sebagai *Gbest*. Untuk setiap partikel, tentukan *Pbest* dengan membandingkan posisi sekarang dengan *Pbest* dari iterasi sebelumnya.
7. Cek kriteria pemberhentian. Saat kriteria pemberhentian tercapai maka hentikan siklus penghitungan, jika kriteria pemberhentian belum tercapai maka ulangi langkah ke 4 hingga kriteria pemberhentian tercapai.

BAB 3

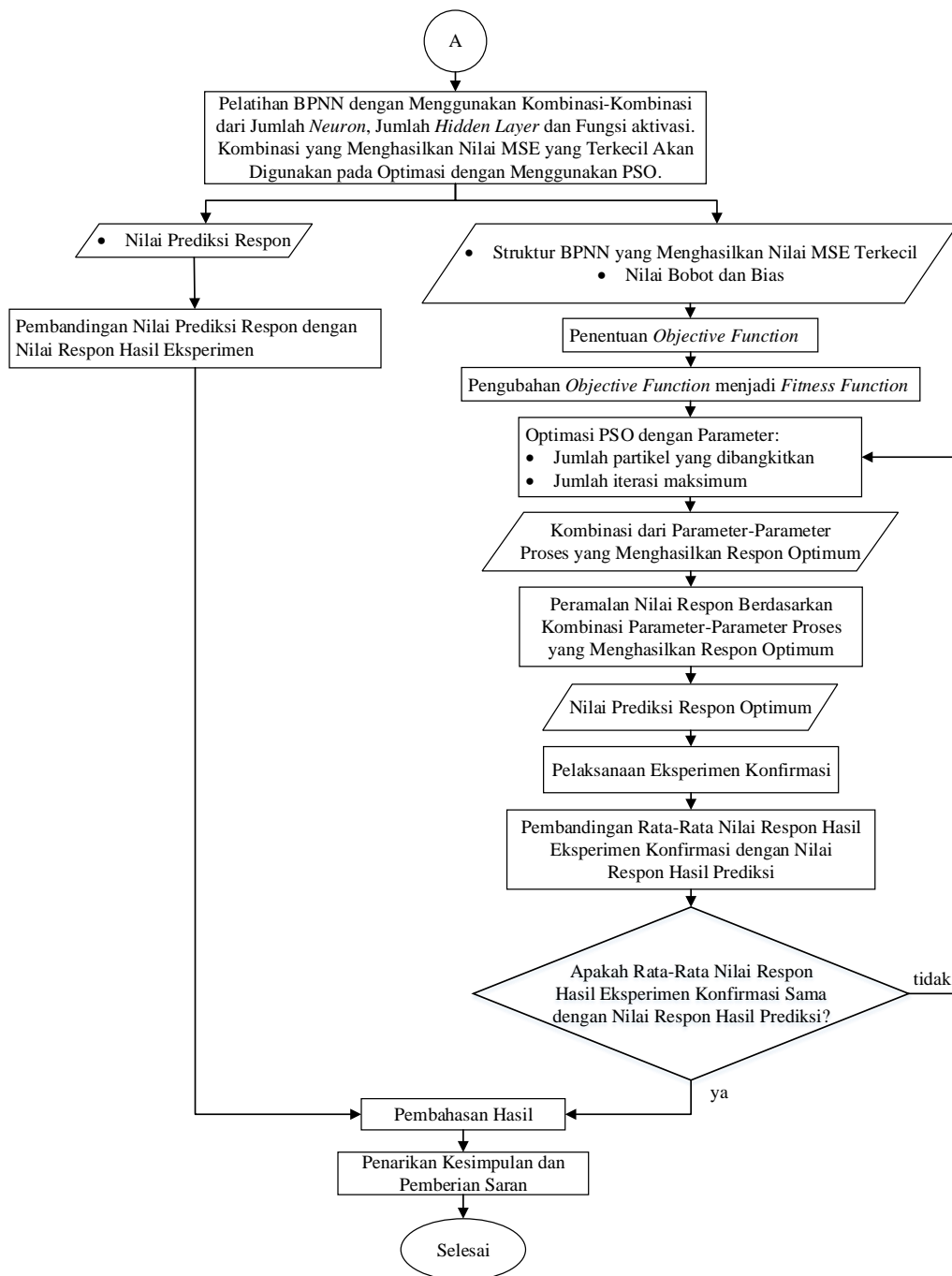
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Secara umum langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian (lanjutan)

3.2 Parameter Penelitian

Parameter-parameter yang digunakan untuk mendapatkan data eksperimen pada proses gurdi material CFRP adalah sebagai berikut:

3.2.1 Parameter Proses

Parameter proses merupakan parameter yang dapat dikendalikan. Nilai parameter dapat ditentukan berdasarkan tinjauan pustaka penelitian-penelitian terdahulu dan percobaan pendahuluan. Parameter proses pada penelitian ini adalah:

- a. Geometri ujung pahat: *X type* dan *Brad & spur*.
- b. Kecepatan spindel (n , rpm): 1000, 2000 dan 3000 rpm.
- c. Kecepatan makan (V_f , mm/min): 50, 150 dan 250 mm/min.

3.2.2 Parameter Respon

Parameter respon merupakan parameter yang besarnya tidak dapat ditentukan. Nilai parameter respon dipengaruhi oleh perlakuan yang diberikan, sehingga nilai parameter respon hanya dapat diketahui setelah melaksanakan percobaan. Parameter respon pada penelitian ini adalah:

- a. Gaya tekan (F_z , N).
- b. Torsi (M_z , Nm).
- c. Delaminasi lubang masuk (F_{dm}).
- d. Delaminasi lubang keluar (F_{dk}).

3.2.3 Parameter Konstan

Parameter konstan merupakan parameter proses yang tidak diteliti pada penelitian. Parameter ini dijaga agar tidak berubah selama proses eksperimen sehingga tidak mempengaruhi hasil eksperimen. Parameter konstan pada penelitian ini adalah:

- a. Diameter pahat sebesar 8 mm.
- b. Panjang langkah pemotongan sebesar 15 mm.

3.3 Peralatan dan Bahan Penelitian

Peralatan dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.3.1 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Mesin CNC *Drill & Taping Machine*

Mesin CNC yang digunakan adalah jenis mesin CNC *drill & taping machine* dengan merk Brother TC-22A-O seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2. Mesin ini memiliki putaran spindel sebesar 75-12000 rpm dan kecepatan makan sebesar 1-20000 m/menit. Mesin ini memiliki 3 axis, dimana masing-masing panjang axisnya adalah sumbu X sebesar 500 mm, sumbu Y sebesar 400 mm dan sumbu Z sebesar 410 mm.



Gambar 3.2 Mesin CNC Brother TC-22A-O

2. Dinamometer

Dinamometer yang digunakan adalah dinamometer merek Kistler tipe 9272 seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3. Dinamometer ini berfungsi untuk mengukur gaya tekan (F_z) dan torsi (M_z) pada saat penggurdian.



Gambar 3.3 Dinamometer Tipe 9272

3. *Charge Amplifier* Tipe 5070A

Charge amplifier yang terhubung dengan dinamometer digunakan untuk menampilkan hasil pengukuran gaya potong. *Charge amplifier* ini ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.4 *Charge Amplifier* Tipe 5070A

4. Akusisi Data Tipe 5697A

Akusisi data digunakan sebagai penghubung dari *charge amplifier* dan dinamometer ke *notebook*, sehingga data dapat ditampilkan pada *notebook*. Akusisi data ditunjukkan pada Gambar 3.4 memiliki dimensi 208 mm x 70 mm x 249 mm.



Gambar 3.5 Akusisi Data Tipe 5697A

5. *Notebook*

Notebook digunakan untuk menampilkan dan mengolah data hasil percobaan. *Notebook* yang sudah memiliki perangkat lunak DynoWare dari Kistler yang ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 *Notebook* Compaq Presario CQ35-336TX

6. Mikroskop Makro

Mikroskop makro digunakan untuk mengambil gambar lubang hasil penggurdian. Gambar ini digunakan untuk mengukur Delaminasi lubang hasil penggurdian dengan menggunakan perangkat lunak Autocad. Mikroskop makro yang digunakan adalah Carl Zeiss Stemi DV4 Series Stereomicroscopes dengan pembesaran 8X hingga 32X seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Mikroskop Makro Carl Zeiss Stemi DV4 Series Stereomicroscopes

7. Mesin Gerinda Pahat Gurdi (*Drill resharpening grinder*)

Drill resharpening grinder digunakan untuk membentuk sudut ujung pahat dan menajamkan mata potong pahat sesuai dengan standar dari pabrik. Proses penggerindaan pahat gurdi dilakukan agar ketajaman sisi potong pahat gurdi selalu sama pada setiap saat proses penggurdian dilakukan. Proses penggerindaan ujung pahat ini menggunakan mesin

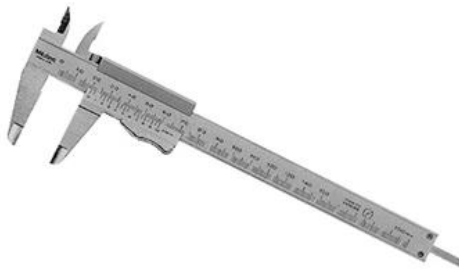
drill resharpening grinder merk Vertex seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Mesin Gerinda Pahat Gurdi Vertex

8. Mistar Ingsut

Mistar ingsut digunakan untuk mengukur dimensi spesimen uji dan memiliki kecermatan 0,02 mm. Mistar ingsut ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Mistar Ingsut

3.3.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pahat Gurdi

Terdapat dua jenis pahat gurdi yang digunakan pada penelitian ini, yaitu:

a) Pahat *Carbide* Merek Sumitomo

Pahat gurdi ini termasuk ke dalam jenis *twist drill* dengan spesifikasi sebagai berikut:

Merek dagang	= Sumitomo
Geometri ujung pahat	= X
Jumlah alur/ <i>flute</i>	= 2 buah
Sudut ujung pahat	= 140°
Sudut puntir	= 30°
Diameter	= 8 mm
Panjang alur	= 49,4 mm
Panjang total pahat	= 91,4 mm

b) Pahat *High speed steel* (HSS) Merek Solid

Pahat gurdi ini termasuk ke dalam jenis *Brad & spur* drill dengan spesifikasi sebagai berikut:

Merek dagang	= Solid
Geometri ujung pahat	= <i>Brad & spur</i>
Jumlah alur/ <i>flute</i>	= 2 buah
Sudut puntir	= 30°
Diameter	= 8 mm
Panjang alur	= 74 mm
Panjang total pahat	= 117 mm

Kedua jenis pahat tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 (a) Pahat *Carbide* Sumitomo (b) Pahat HSS Solid

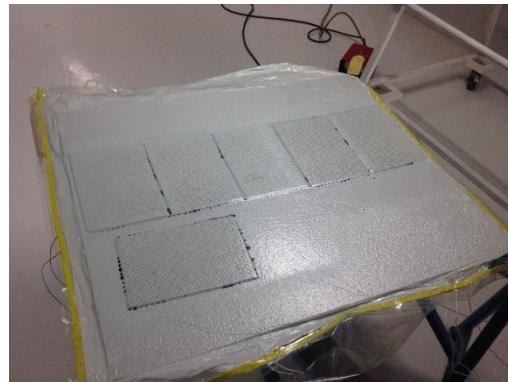
2. Benda kerja

Benda kerja yang digunakan pada penelitian ini adalah *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) yang tersusun dari *carbon fiber prepeg* dan *adhesive film*. *Carbon fiber prepeg* dan *adhesive film* kemudian disusun mengikuti *standard repair manual* seperti ditunjukkan pada Lampiran

A, lalu diproses *curing* untuk mengeras material komposit. Proses *curing* dilakukan dengan menggunakan mesin *hot blanket* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.11 (a) dengan temperatur 350°F selama 150 menit. Proses *Hot blanket* untuk *curing* material komposit ditunjukkan pada Gambar 3.14 (b).



(a)



(b)

Gambar 3.11 (a) Mesin *Hot Blanket* merk Heatcon (b) *Hot Blanket* pada Proses *Curing* CFRP

Dimensi benda kerja setelah proses *curing* memiliki panjang 300 mm, lebar 200 mm dan tebal 3 mm. Spesimen uji kemudian dipotong, sehingga dimensi benda kerja yang akan digunakan adalah 200 mm x 30 mm x 3 mm seperti ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Spesimen CFRP Setelah Proses *Curing*

3.4 Rancangan Percobaan

3.4.1 Parameter Proses pada Mesin Gurdi

Parameter proses pada mesin gurdi dipilih berdasarkan dari penelitian-penelitian sebelumnya dan percobaan pendahuluan. Parameter proses yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter Proses dan Pengaturan Level

Parameter Proses			Level 1	Level 2	Level 3
A	Geometri ujung pahat	-	<i>X type</i>	<i>Brad & spur</i>	-
B	Kecepatan spindel	rpm	1000	2000	3000
C	Kecepatan makan	mm/min	50	150	250

3.4.2 Pemilihan Desain Eksperimen

Penelitian ini menggunakan rancangan percobaan faktorial, dengan tiga parameter proses yang digunakan. Satu parameter proses mempunyai dua level dan dua parameter proses yang lainnya masing-masing mempunyai tiga level. Rancangan seperti ini bisa juga disebut desain faktorial 2 x 3 x 3. Respon-respon yang diamati pada penelitian ini adalah gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar. Rancangan percobaan ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Desain Eksperimen Faktorial 2 x 3 x 3

Parameter Proses			Parameter Respon											
Geometri Ujung Pahat	Kecepatan Spindel (rpm)	Kecepatan Makan (mm/min)	Gaya Tekan (N)			Torsi (Nm)			Delaminasi Lubang Masuk			Delaminasi Lubang Keluar		
			Rep.1	Rep.2	Rep. 3	Rep.1	Rep.2	Rep. 3	Rep.1	Rep.2	Rep. 3	Rep.1	Rep.2	Rep. 3
<i>X type</i>	1000	50												
		150												
		250												
	2000	50												
		150												
		250												
	3000	50												
		150												
		250												
<i>Brad & spur</i>	1000	50												
		150												
		250												
	2000	50												
		150												
		250												
	3000	50												
		150												
		250												

3.5 Prosedur Percobaan

Langkah-langkah percobaan yang dilakukan pada penelitian ini untuk mendapatkan data gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar adalah sebagai berikut:

1. Penyiapan spesimen uji yang meliputi penyesuaian ukuran, pemberian tanda/titik pada spesimen yang akan digurdi, pembersihan spesimen dari kotoran-kotoran yang dapat mengganggu proses penggurdian dan penomoran spesimen.
2. Pemasangan dinamometer beserta kelengkapannya pada mesin gurdi seperti ditunjukkan pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Pemasangan Peralatan pada Proses Penggurdian CFRP

3. Penghubungan dinamometer dan *charge amplifier* Kistler tipe 5070A dengan menggunakan kabel koneksi tipe Kistler 16775A.
4. Penghubungan *charge amplifier* Kistler tipe 5070A dan DAQ Kistler tipe 5697 dengan menggunakan kabel koneksi 1700A111A2 dan 1200A27.
5. Penghubungan sistem DAQ Kistler tipe 5697A dan *notebook* dengan menggunakan kabel USB.
6. Penghubungan *charge amplifier* Kistler tipe 5070A dan sistem DAQ Kistler tipe 5697A ke sumber listrik.
7. Pemasangan spesimen uji pada dinamometer dengan *jig* yang telah dipasang pada mesin seperti ditunjukkan pada Gambar 3.13.



Gambar 3.14 Proses Pengukuran Data Gaya Tekan dan Torsi dengan Menggunakan Dinamometer pada Penggurdian Material CFRP

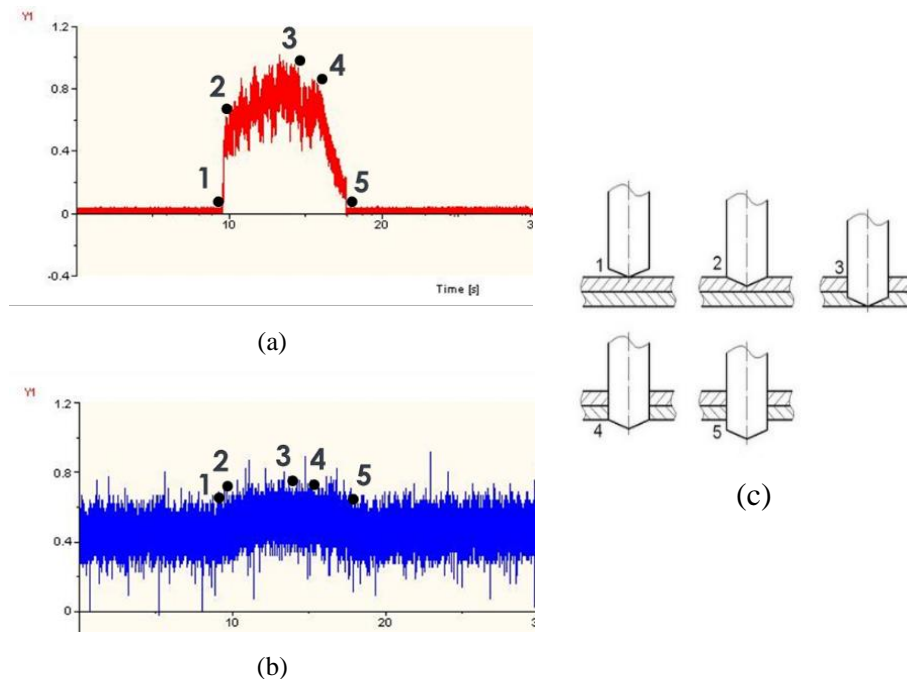
8. Pemasangan pahat gudi berdiameter 8 mm dan mengatur posisinya agar tepat pada tanda/titik yang telah disiapkan.
9. Pengaturan parameter-parameter proses yang telah ditetapkan sesuai dengan rancangan percobaan.
10. Penggurdian spesimen sesuai dengan pengaturan parameter proses yang telah ditentukan.
11. Penyimpanan data grafik gaya tekan dan torsi yang diperoleh dari dinamometer untuk selanjutnya diolah sebagai data parameter respon penelitian.
12. Pelepasan spesimen uji setelah proses penggurdian selesai.
13. Pengulangan langkah ketujuh hingga keduabelas untuk kombinasi parameter proses berikutnya.
14. Pengambilan gambar lubang dengan kamera digital pada mikroskop makro, kemudian mengukur delaminasi lubang dengan bantuan perangkat lunak Autocad.

3.6 Pengukuran Data Respon

3.6.1 Pengukuran Gaya Tekan dan Torsi

Hasil pengukuran gaya tekan dan torsi dengan menggunakan dinamometer selama proses pemotongan dapat dilihat pada grafik yang ditampilkan oleh *software*

Dyno Wire. Gambar 3.15 (a) dan (b) menunjukkan grafik hasil pengukuran gaya tekan dan torsi oleh dinamometer. Nilai Gaya tekan dan torsi yang digunakan pada penelitian ini adalah nilai rata-rata diantara titik 2 dan titik 4. Titik 2 merupakan posisi dimana seluruh sisi potong pahat telah berada di dalam benda kerja dan titik 4 merupakan posisi dimana seluruh sisi potong pahat telah menembus benda kerja.



Gambar 3.15 (a) Grafik Pengukuran Gaya Tekan (b) Grafik Pengukuran Torsi
(c) Posisi Pahat Pada Grafik Gaya Tekan dan Torsi.

3.6.2 Pengukuran Delaminasi

Langkah-langkah dari pengukuran delaminasi adalah sebagai berikut:

1. Persiapan spesimen uji.
2. Pengambilan semua gambar lubang hasil penggurdian dengan menggunakan mikroskop makro.
3. Pemasukan gambar lubang hasil penggurdian ke dalam perangkat Autocad.
4. Penentuan titik pusat lubang hasil penggurdian.
5. Pengukuran D_{max} lubang hasil penggurdian.
6. Penghitungan nilai delaminasi dengan menggunakan persamaan 2.26.
7. Pengulangan langkah ketiga hingga keenam untuk mendapatkan hasil delaminasi.

3.7 Karakteristik Respon Optimal

Karakteristik respon optimal yang digunakan pada penelitian ini adalah semakin kecil semakin baik, dan berlaku untuk gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar. Nilai gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar yang paling diharapkan adalah yang paling minimum.

3.8 Metode Optimasi Nilai Respon dengan Menggunakan *Backpropagation Neural Network* (BPNN) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO).

Optimasi nilai respon pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode prediksi BPNN diintegrasikan dengan metode optimasi PSO. Langkah-langkah optimasi nilai respon dengan menggunakan metode ini sesuai dengan diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.16, dengan penjelasannya sebagai berikut:

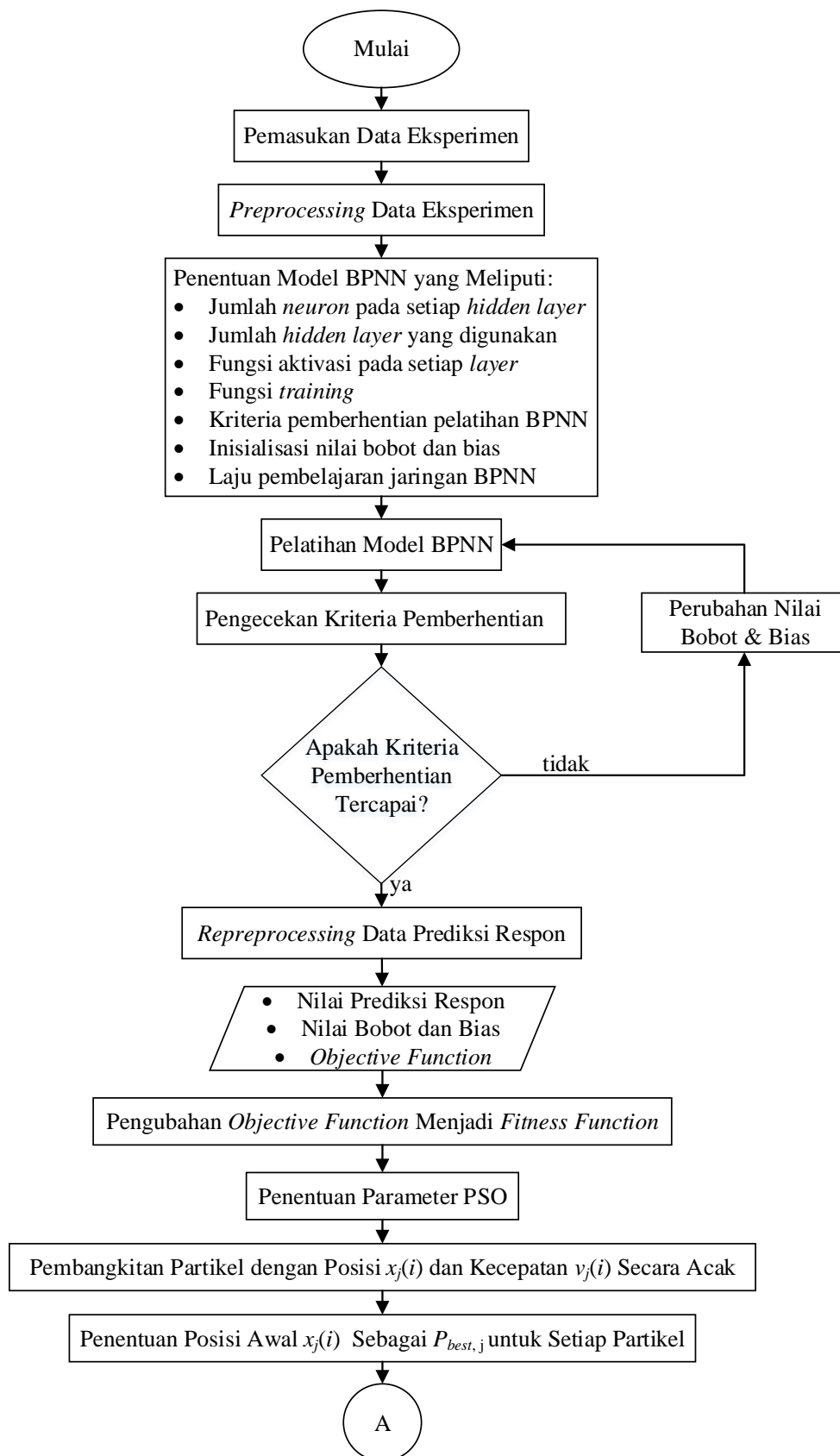
1. Pemasukan data hasil eksperimen penggurdian.
2. *Preprocessing* untuk data *input* BPNN. *Preprocessing* digunakan untuk melakukan normalisasi data eksperimen yang memiliki satuan dan interval yang berbeda-beda menjadi data yang tidak memiliki satuan dengan interval diantara [-1,1].
3. Penentuan arsitektur jaringan BPNN yang meliputi:
 - a. Penentuan jumlah *neuron* pada *hidden layer*, jumlah *hidden layer* yang digunakan, fungsi aktivasi yang digunakan pada setiap *layer* dan fungsi *training* yang digunakan untuk menyelesaikan model prediksi BPNN.
 - b. Penentuan kriteria pemberhentian BPNN. Kriteria pemberhentian tersebut terdiri dari jumlah *epoch* maksimum, waktu itersi maksimum, nilai performa maksimum dan nilai gradien maksimum.
 - c. Penentuan inisialisasi nilai bobot dan bias yang digunakan sesuai dengan *default* perangkat lunak Matlab seri R2015a.

- d. Pemilihan secara acak data *training*, *testing* dan validasi berdasarkan presentase yang telah ditetapkan untuk data *training*, *testing* dan validasi
- e. Penentuan laju pembelajaran prediksi BPNN.
4. Pelatihan BPNN.
5. Pemeriksaan terhadap kriteria pemberhentian, dengan mencari kriteria pemberhentian mana yang telah tercapai. Bila salah satu kriteria pemberhentian belum tercapai, maka pelatihan serta pengujian dilakukan kembali dengan mengulangi langkah ke-4 dengan merubah nilai bobot dan bias berdasarkan fungsi *training*.
6. *Reprocessing* data hasil prediksi nilai respon BPNN. Langkah ini dilakukan untuk memperoleh nilai hasil prediksi yang sebenarnya, bukan nilai-nilai pada interval $[-1,1]$.
7. Pencatatan hasil dari proses BPNN adalah *objective function*, nilai bobot, nilai bias dan nilai prediksi respon.
8. Pengubahan *objective function* yang didapat dari BPNN menjadi *fitness function*. *Fitness function* ini akan diminimalkan nilainya dengan menggunakan metode PSO.
9. Penentuan parameter PSO berupa maksimum iterasi dan jumlah partikel yang dibangkitkan.
10. Pembangkitan partikel dengan posisi $x_j(i)$ dan kecepatan $v_j(i)$ secara acak.
11. Penentuan posisi awal sebagai $P_{best,j}$ untuk setiap partikel.
12. Penghitungan nilai *fitness* $F[x_j(i)]$ untuk setiap partikel.
13. Penetapan partikel yang menghasilkan nilai $F[x_j(i)]$ terbaik sebagai G_{best} .
15. Perbandingan nilai $F[x_j(i)]$ dengan nilai $F[P_{best,j}]$ untuk masing-masing partikel. Apabila nilai $F[x_j(i)] < F[P_{best,j}]$ maka posisi $x_j(i)$ digunakan sebagai $P_{best,j}$ baru. Tetapi, apabila nilai $F[x_j(i)] > F[P_{best,j}]$ maka $P_{best,j}$ lama tetap digunakan untuk setiap partikel.

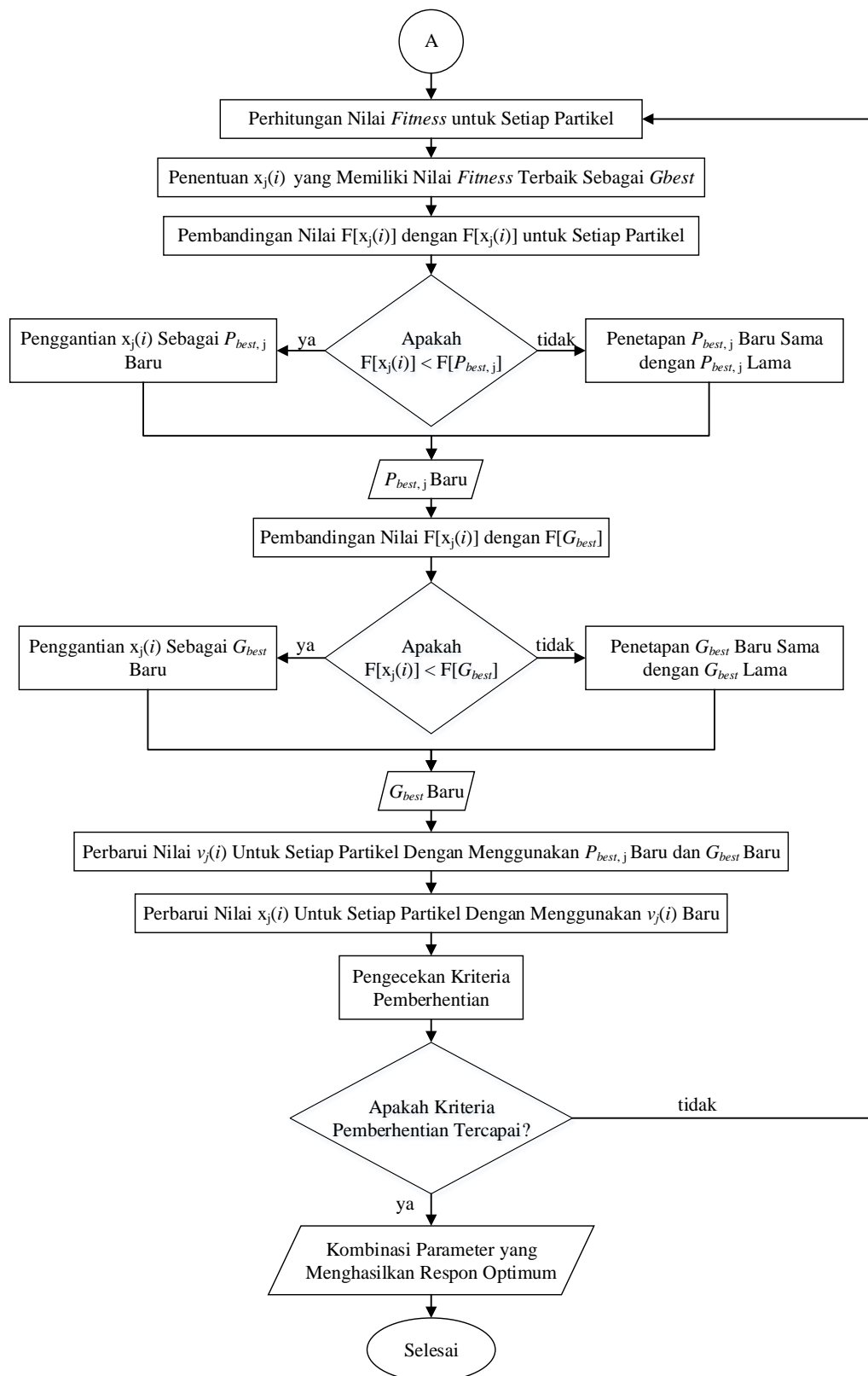
16. Pembandingan nilai $F[x_j(i)]$ dengan $F[G_{best}]$. Apabila nilai $F[x_j(i)] < F[G_{best}]$ maka posisi $x_j(i)$ digunakan sebagai G_{best} baru. Tetapi, apabila nilai $F[x_j(i)] > F[G_{best}]$ maka G_{best} lama tetap digunakan.
17. Pembaruan nilai $v_j(i)$ dengan menggunakan nilai $P_{best,j}$ baru dan G_{best} baru untuk setiap partikel.
18. Pembaruan nilai $x_j(i)$ dengan menggunakan nilai $v_j(i)$ baru untuk setiap partikel.
19. Pemeriksaan terhadap kriteria pemberhentian. Apabila salah satu dari kriteria pemberhentian sudah tercapai maka pengaturan parameter proses yang menghasilkan respon optimum sudah didapatkan. Namun apabila salah satu dari kriteria pemberhentian belum tercapai maka ulangi langkah ke 12 hingga langkah ke 19 dengan posisi partikel yang baru.

BPNN dapat menghasilkan prediksi respon dengan tepat jika arsitektur jaringan BPNN yang digunakan menghasilkan nilai MSE terkecil. Nilai MSE yang terkecil dapat dicapai jika arsitektur jaringan BPNN yang digunakan adalah tepat. Oleh karena itu, perlu dilakukan optimasi jaringan BPNN yang meliputi penentuan jumlah *neuron*, jumlah *hidden layer*, fungsi aktivasi pada masing-masing *layer* dan fungsi *training* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.17. Langkah-langkah optimasi jaringan BPNN dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Pemasukan data hasil eksperimen penggurdian.
2. *Preprocessing* untuk data *input* BPNN. *Preprocessing* digunakan untuk melakukan normalisasi data eksperimen yang memiliki satuan dan interval yang berbeda-beda menjadi data yang tidak memiliki satuan dengan interval diantara $[-1,1]$.
3. Penentuan arsitektur jaringan BPNN yang meliputi:
 - a. Jumlah *neuron* yang ditetapkan pada setiap *hidden layer* adalah sebanyak 5.
 - b. Jumlah *hidden layer* yang ditetapkan adalah 1 *hidden layer*.



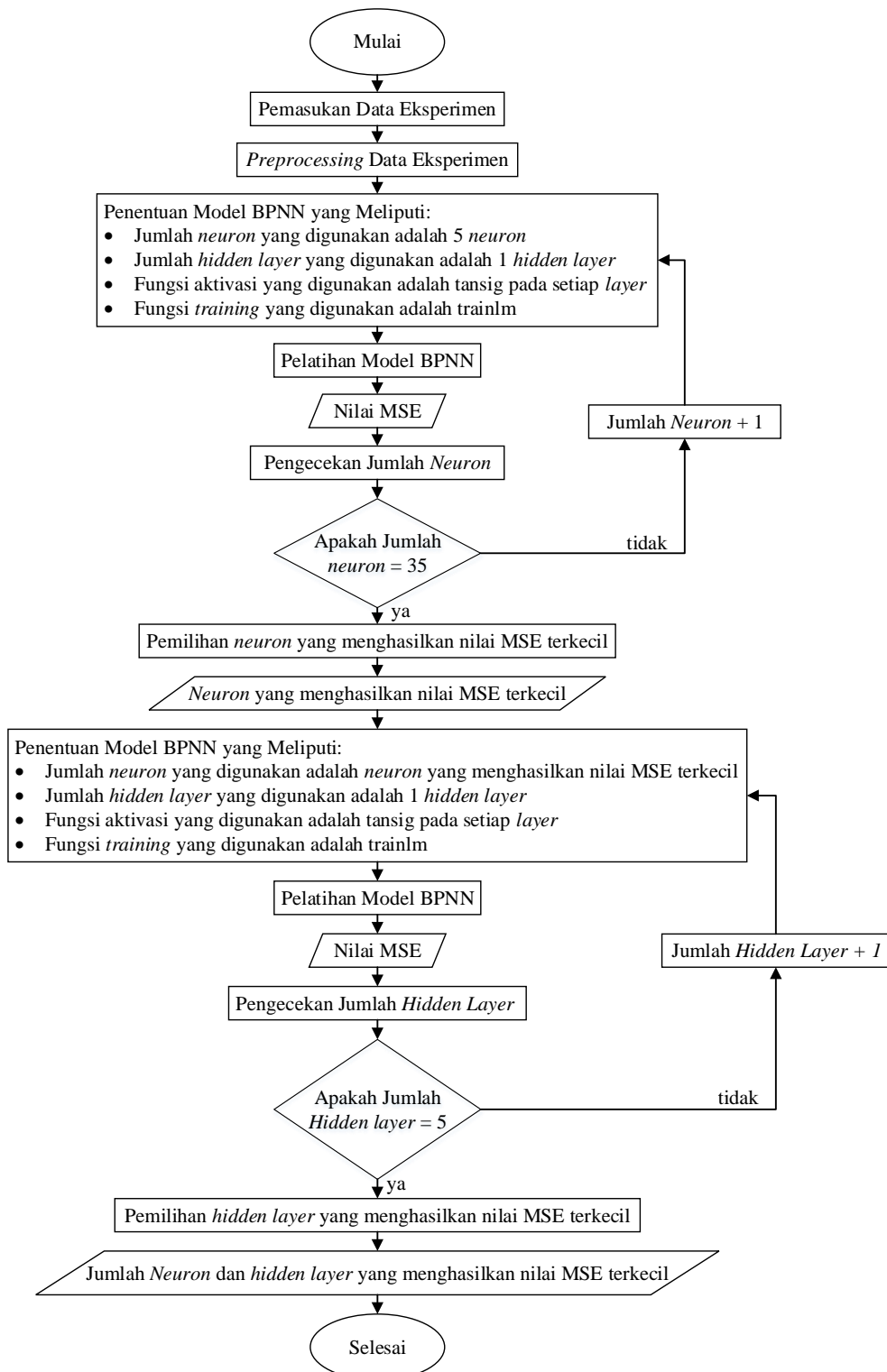
Gambar 3.16 Langkah-Langkah Metode Optimasi PSO



Gambar 3.16 Langkah-Langkah Metode Optimasi PSO (lanjutan)

- c. Fungsi aktivasi yang digunakan pada setiap *hidden layer* adalah tansig.
 - d. Fungsi *training* yang digunakan untuk menyelesaikan model prediksi BPNN adalah trainlm.
4. Pelatihan BPNN.
 5. Penyimpanan nilai MSE dari pelatihan BPNN.
 6. Pemeriksaan terhadap jumlah *neuron*. Apabila jumlah *neuron* yang digunakan pada pelatihan BPNN tidak sama dengan 35, maka dilakukan pengulangan langkah ke-3 hingga langkah ke-6 dengan menambahkan satu *neuron* pada setiap iterasinya. Jika jumlah *neuron* yang digunakan pada pelatihan BPNN sama dengan 35, maka dilakukan pemilihan jumlah *neuron* yang menghasilkan nilai MSE terkecil dari seluruh pelatihan jaringan.
 7. Penentuan arsitektur jaringan BPNN yang meliputi:
 - a. Jumlah *neuron* yang digunakan pada setiap *hidden layer* sama dengan jumlah *neuron* yang menghasilkan nilai MSE terkecil dari seluruh pelatihan jaringan.
 - b. *Hidden layer* yang digunakan adalah satu.
 - c. Fungsi aktivasi yang digunakan pada setiap *hidden layer* adalah tansig.
 - d. Fungsi *training* yang digunakan untuk menyelesaikan model prediksi BPNN adalah trainlm.
 8. Pelatihan BPNN.
 9. Penyimpanan nilai MSE dari pelatihan BPNN.
 10. Pemeriksaan terhadap jumlah *hidden layer*. Apabila jumlah *hidden layer* yang digunakan pada pelatihan BPNN tidak sama dengan 5, maka dilakukan pengulangan langkah ke-7 hingga langkah ke-10 dengan menambahkan satu *hidden layer* pada setiap iterasinya. Jika jumlah *hidden layer* yang digunakan pada pelatihan BPNN sama dengan 5, maka dilakukan pemilihan *hidden layer* yang menghasilkan nilai MSE terkecil dari seluruh pelatihan jaringan.

11. Pencatatan hasil dari optimasi jaringan BPNN yang berupa jumlah *neuron* dan *hidden layer* yang menghasilkan nilai MSE terkecil dari seluruh pelatihan jaringan.



Gambar 3.17 Langkah-Langkah Optimasi Jaringan BPNN

BAB 4

OPTIMASI MULTI RESPON DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengukuran

Eksperimen dilakukan dengan mengkombinasikan parameter-parameter proses gurdi pada material CFRP yang memiliki pengaruh terhadap respon gaya tekan (F_z), torsi (M_z), delaminasi lubang masuk (F_{dm}) dan delaminasi lubang keluar (F_{dk}). Parameter-parameter proses tersebut adalah geometri ujung pahat (P_a), kecepatan spindel (n) dan kecepatan makan (V_f).

Pengukuran yang dilakukan pertama kali adalah pengukuran gaya tekan dan torsi dengan menggunakan dinamometer KISTLER tipe 9272, selanjutnya dilakukan pengukuran delaminasi pada lubang masuk dan lubang keluar. Pengukuran delaminasi lubang masuk dan keluar dilakukan dengan menggunakan mikroskop makro. Gambar hasil mikroskop makro kemudian diukur dengan menggunakan perangkat lunak Autocad untuk mendapatkan nilai delaminasi dari lubang masuk dan lubang keluar. Hasil pengukuran secara keseluruhan berdasarkan rancangan percobaan factorial $2 \times 3 \times 3$ ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Hasil Eksperimen

No	Geometri Ujung Pahat	Kecepatan Spindel (rpm)	Kecepatan Makan (mm/min)	Gaya Tekan (N)	Torsi (Nm)	Delaminasi Lubang Masuk	Delaminasi Lubang Keluar
1	<i>X type</i>	2000	250	29,69	0,766	1,435	1,109
2	<i>Brad & spur</i>	1000	250	178,60	1,224	1,145	1,520
3	<i>Brad & spur</i>	2000	150	101,55	0,897	1,073	1,286
4	<i>X type</i>	3000	50	24,22	0,639	1,072	1,014
5	<i>Brad & spur</i>	1000	150	125,60	1,093	1,087	1,372
6	<i>X type</i>	2000	150	28,50	0,737	1,256	1,070
7	<i>X type</i>	1000	250	32,74	0,849	1,523	1,124
8	<i>Brad & spur</i>	3000	50	28,47	0,752	1,020	1,078
9	<i>Brad & spur</i>	3000	150	64,55	0,883	1,054	1,154
10	<i>Brad & spur</i>	2000	250	130,70	0,931	1,092	1,445
11	<i>X type</i>	2000	50	25,63	0,721	1,189	1,032
12	<i>Brad & spur</i>	3000	250	88,47	0,908	1,074	1,344
13	<i>X type</i>	3000	150	25,9	0,670	1,158	1,054

Tabel 4.1 Data Hasil Eksperimen (lanjutan)

No	Geometri Ujung Pahat	Kecepatan Spindel (rpm)	Kecepatan Makan (mm/min)	Gaya Tekan (N)	Torsi (Nm)	Delaminasi Lubang Masuk	Delaminasi Lubang Keluar
14	<i>X type</i>	1000	50	29,87	0,735	1,285	1,048
15	<i>X type</i>	3000	250	28,3	0,698	1,379	1,086
16	<i>X type</i>	1000	150	32,1	0,771	1,383	1,085
17	<i>Brad & spur</i>	2000	50	54,30	0,763	1,054	1,123
18	<i>Brad & spur</i>	1000	50	78,49	0,873	1,072	1,213
19	<i>X type</i>	2000	50	26,14	0,699	1,202	1,038
20	<i>Brad & spur</i>	2000	250	130,20	1,015	1,099	1,435
21	<i>Brad & spur</i>	3000	250	90,44	0,942	1,068	1,324
22	<i>Brad & spur</i>	2000	150	88,26	0,905	1,064	1,272
23	<i>Brad & spur</i>	1000	50	68,22	0,907	1,064	1,245
24	<i>X type</i>	1000	50	29,15	0,722	1,261	1,049
25	<i>Brad & spur</i>	3000	150	62,33	0,786	1,042	1,132
26	<i>Brad & spur</i>	1000	250	188,60	1,225	1,113	1,570
27	<i>X type</i>	1000	150	30,51	0,759	1,316	1,082
28	<i>X type</i>	2000	150	27,43	0,728	1,280	1,069
29	<i>X type</i>	3000	250	26,91	0,705	1,398	1,072
30	<i>Brad & spur</i>	2000	50	43,49	0,782	1,048	1,132
31	<i>X type</i>	2000	250	30,67	0,745	1,450	1,098
32	<i>Brad & spur</i>	3000	50	29,08	0,709	1,034	1,085
33	<i>X type</i>	3000	50	22,56	0,648	1,043	1,021
34	<i>X type</i>	1000	250	33,52	0,852	1,519	1,114
35	<i>X type</i>	3000	150	25,22	0,660	1,192	1,042
36	<i>Brad & spur</i>	1000	150	140,20	1,044	1,095	1,384
37	<i>Brad & spur</i>	1000	50	47,51	0,853	1,078	1,189
38	<i>Brad & spur</i>	2000	50	32,10	0,740	1,052	1,114
39	<i>Brad & spur</i>	3000	250	86,87	0,893	1,078	1,365
40	<i>X type</i>	3000	250	27,00	0,697	1,402	1,083
41	<i>X type</i>	2000	250	31,3	0,752	1,425	1,104
42	<i>Brad & spur</i>	2000	250	126,60	0,964	1,084	1,472
43	<i>X type</i>	1000	150	31,56	0,762	1,352	1,088
44	<i>X type</i>	2000	150	29,4	0,727	1,279	1,068
45	<i>Brad & spur</i>	1000	150	137,40	1,083	1,092	1,367
46	<i>Brad & spur</i>	3000	50	29,76	0,701	1,028	1,081
47	<i>X type</i>	3000	50	23,41	0,637	1,050	1,018
48	<i>X type</i>	1000	250	34,45	0,843	1,512	1,105
49	<i>Brad & spur</i>	1000	250	153,00	1,287	1,125	1,548

Tabel 4.1 Data Hasil Eksperimen (lanjutan)

No	Geometri Ujung Pahat	Kecepatan Spindel (rpm)	Kecepatan Makan (mm/min)	Gaya Tekan (N)	Torsi (Nm)	Delaminasi Lubang Masuk	Delaminasi Lubang Keluar
50	<i>Brad & spur</i>	2000	150	116,30	0,991	1,079	1,293
51	<i>X type</i>	1000	50	28,22	0,723	1,245	1,043
52	<i>X type</i>	3000	150	24,85	0,658	1,178	1,047
53	<i>X type</i>	2000	50	27,3	0,709	1,195	1,035
54	<i>Brad & spur</i>	3000	150	63,48	0,870	1,046	1,149

Sumber: Hasil Pengukuran

4.2 Metode Prediksi *Back Propagation Neural Network* (BPNN)

Data yang dijadikan sebagai *input* pada BPNN adalah kombinasi parameter-parameter proses geometri ujung pahat, kecepatan spindel dan kecepatan makan. Data yang dijadikan sebagai *output* adalah data respon yaitu gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar yang didapat dari hasil eksperimen. Secara umum, tahapan-tahapan pada BPNN adalah sebagai berikut:

- *Pre-processing* (normalisasi) terhadap data.
- Penentuan arsitektur jaringan (*input layer*, *hidden layer* dan *output layer*).
- Penentuan kriteria pemberhentian BPNN.
- Pelaksanaan *training*, *testing* dan validasi data.

4.2.1 *Pre-processing* (normalisasi) data *input* dan *output*

Data yang akan digunakan untuk *input* dan *output* pada BPNN harus dinormalisasi sesuai dengan interval keluaran dari fungsi aktivasi yang digunakan. Proses normalisasi data adalah proses untuk mengubah nilai data menjadi nilai yang besarnya antara -1 sampai 1. Penghitungan *Preprocessing* data *input* dan data *output* dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan 4.1 sebagai berikut:

$$p_n = \frac{2(p - \min(p))}{(\max(p) - \min(p))} - 1 \quad (4.1)$$

Dengan:

p = data parameter *input* dan respon dari eksperimen

pn = data hasil normalisasi parameter *input* dan respon eksperimen

Contoh perhitungan normalisasi nilai gaya tekan untuk percobaan pertama adalah sebagai berikut:

1. Penentuan nilai maksimum dan minimum

Nilai maksimum gaya tekan = 188,6 N

Nilai minimum gaya tekan = 22,56 N

2. Perhitungan normalisasi

$$p_n = \frac{2(p - \min(p))}{(\max(p) - \min(p))} - 1$$

$$p_n = \frac{2(29,69 - 22,56)}{(188,6 - 22,56)} - 1$$

$$p_n = -0,91412$$

Preprocessing juga dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Matlab seri R2015a. Fungsi *mapminmax* yang tersedia pada perangkat lunak Matlab seri R2015a digunakan untuk melakukan proses normalisasi. Hasil normalisasi dari data eksperimen proses gurdi untuk setiap parameter proses dan parameter respon, diubah menjadi nilai yang besarnya antara -1 sampai 1 ditunjukkan pada Tabel 4.2. Data pada Tabel 4.2 digunakan sebagai parameter *input* dan parameter *output* pada BPNN dengan menggunakan perangkat lunak Matlab seri R2015a.

Tabel 4.2 Normalisasi Nilai Data *Input* dan Respon

No	Geometri Ujung Pahat	Kecepatan Spindel	Kecepatan Makan	Gaya Tekan	Torsi	Delaminasi Lubang Masuk	Delaminasi Lubang Keluar
1	-1	0	1	-0,914	-0,603	0,650	-0,658
2	1	-1	1	0,880	0,806	-0,503	0,820
3	1	0	0	-0,049	-0,199	-0,789	-0,022
4	-1	1	-1	-0,980	-0,993	-0,451	-1,000
5	1	-1	0	0,241	0,404	-0,734	0,288
6	-1	0	0	-0,928	-0,692	-0,328	-0,799
7	-1	-1	1	-0,877	-0,347	1,000	-0,604
8	1	1	-1	-0,929	-0,645	-1,000	-0,770
9	1	1	0	-0,494	-0,242	-0,865	-0,496
10	1	0	1	0,303	-0,095	-0,714	0,550
11	-1	0	-1	-0,963	-0,740	-0,062	-0,935

Tabel 4.2 Normalisasi Nilai Data *Input* dan Respon (lanjutan)

No	Geometri Ujung Pahat	Kecepatan Spindel	Kecepatan Makan	Gaya Tekan	Torsi	Delaminasi Lubang Masuk	Delaminasi Lubang Keluar
12	1	1	1	-0,206	-0,164	-0,785	0,187
13	-1	1	0	-0,960	-0,898	-0,793	-0,856
14	-1	-1	-1	-0,912	-0,698	0,441	-0,878
15	-1	1	1	-0,931	-0,810	0,427	-0,741
16	-1	-1	0	-0,885	-0,586	0,054	-0,785
17	1	0	-1	-0,618	-0,612	-0,865	-0,608
18	1	-1	-1	-0,326	-0,272	-0,793	-0,284
19	-1	0	-1	-0,957	-0,809	0,034	-0,914
20	1	0	1	0,297	0,164	-0,686	0,514
21	1	1	1	-0,182	-0,060	-0,809	0,115
22	1	0	0	-0,209	-0,175	-0,825	-0,072
23	1	-1	-1	-0,450	-0,167	-0,825	-0,169
24	-1	-1	-1	-0,921	-0,739	0,178	-0,875
25	1	1	0	-0,521	-0,541	-0,913	-0,576
26	1	-1	1	1,000	0,809	-0,630	1,000
27	-1	-1	0	-0,904	-0,624	-0,041	-0,835
28	-1	0	0	-0,941	-0,718	-0,276	-0,785
29	-1	1	1	-0,948	-0,788	0,503	-0,791
30	1	0	-1	-0,748	-0,554	-0,889	-0,576
31	-1	0	1	-0,902	-0,668	0,710	-0,698
32	1	1	-1	-0,921	-0,776	-0,944	-0,745
33	-1	1	-1	-1,000	-0,964	-0,316	-0,975
34	-1	-1	1	-0,868	-0,338	0,984	-0,641
35	-1	1	0	-0,968	-0,928	-0,909	-0,899
36	1	-1	0	0,417	0,253	-0,702	0,331
37	1	-1	-1	-0,699	-0,334	-0,769	-0,371
38	1	0	-1	-0,885	-0,682	-0,873	-0,640
39	1	1	1	-0,225	-0,212	-0,769	0,263
40	-1	1	1	-0,947	-0,813	0,519	-0,752
41	-1	0	1	-0,895	-0,646	0,610	-0,676
42	1	0	1	0,253	0,007	-0,746	0,647
43	-1	-1	0	-0,892	-0,615	-0,105	-0,799
44	-1	0	0	-0,918	-0,722	-0,304	-0,806
45	1	-1	0	0,383	0,373	-0,714	0,270
46	1	1	-1	-0,913	-0,801	-0,968	-0,759
47	-1	1	-1	-0,990	-1,000	-0,372	-0,986

Tabel 4.2 Normalisasi Nilai Data *Input* dan Respon (lanjutan)

No	Geometri Ujung Pahat	Kecepatan Spindel	Kecepatan Makan	Gaya Tekan	Torsi	Delaminasi Lubang Masuk	Delaminasi Lubang Keluar
48	-1	-1	1	-0,857	-0,366	0,956	-0,673
49	1	-1	1	0,571	1,000	-0,583	0,919
50	1	0	0	0,129	0,091	-0,765	0,004
51	-1	-1	-1	-0,932	-0,734	0,320	-0,897
52	-1	1	0	-0,972	-0,935	-0,881	-0,881
53	-1	0	-1	-0,943	-0,778	0,030	-0,924
54	1	1	0	-0,507	-0,281	-0,897	-0,514

Sumber: Hasil Perhitungan

4.2.2 Penentuan Arsitektur Jaringan

BPNN dapat menghasilkan prediksi respon dengan tepat jika arsitektur jaringan BPNN yang digunakan menghasilkan nilai MSE terkecil. Arsitektur jaringan yang meliputi jumlah *neuron* dan *hidden layer* ditentukan berdasarkan *trial and error*. Parameter yang divariasikan pada BPNN dibatasi pada:

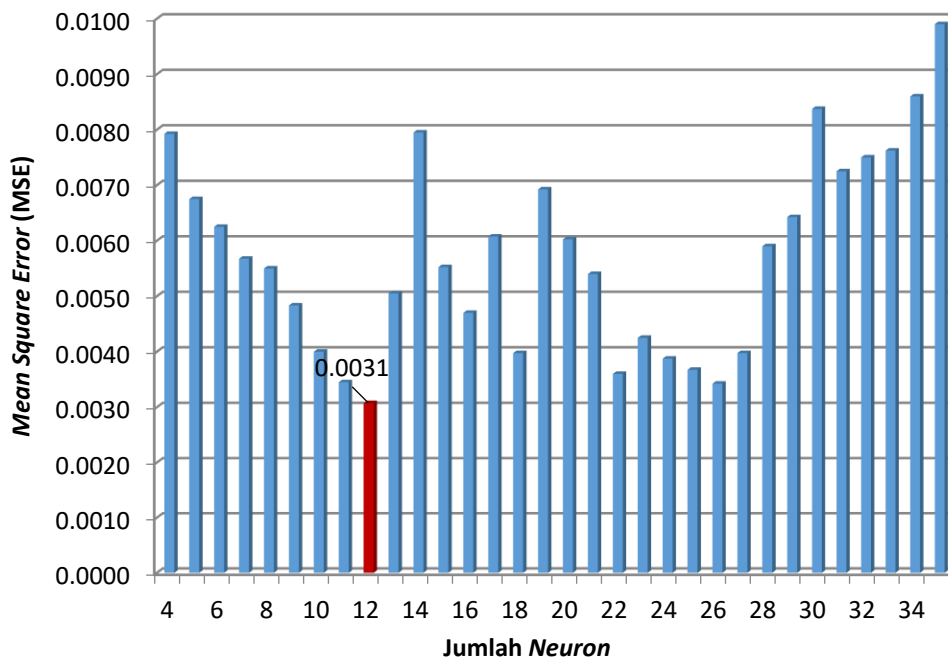
- Jumlah *neuron* pada setiap *hidden layer*, yaitu 4 sampai 35.
- Jumlah *hidden layer*, yaitu 1 hingga 5 *hidden layer*.
- Fungsi aktivasi, yaitu tansig karena normalisasi yang dilakukan memiliki interval -1 sampai 1.
- Fungsi *training*, yaitu *Levenberg Markuens backpropagation* (trainlm) karena fungsi ini menghasilkan penyelesaian dengan itersi yang lebih cepat.

Berdasarkan parameter-parameter yang divariasikan, terdapat 32 kombinasi yang akan dihitung nilai MSE-nya seperti ditunjukkan pada Tabel 4.3. Perhitungan untuk semua kombinasi dilakukan dengan menggunakan *learning rate* sebesar 0,05 dan *performance goal* sebesar 0,0001 (Rong, 2015). Kombinasi jaringan yang menghasilkan nilai *mean square error* (MSE) terkecil, akan dipilih sebagai jumlah *neuron* pada prediksi BPNN. Nilai MSE terkecil dicapai saat jumlah *neuron* yang digunakan adalah sebanyak 12 seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1, sehingga jumlah *neuron* yang digunakan untuk prediksi BPNN adalah sebanyak 12.

Tabel 4.3 Kombinasi Parameter BPNN untuk Penentuan Jumlah *Neuron*

Jaringan ke	Jumlah Neuron	Jumlah Hidden Layer	Fungsi Aktivasi	Fungsi Pelatihan	MSE
1	4	1	tansig	trainlm	0,0079
2	5	1	tansig	trainlm	0,0068
3	6	1	tansig	trainlm	0,0063
4	7	1	tansig	trainlm	0,0057
5	8	1	tansig	trainlm	0,0055
6	9	1	tansig	trainlm	0,0048
7	10	1	tansig	trainlm	0,004
8	11	1	tansig	trainlm	0,0035
9	12	1	tansig	trainlm	0,0031
10	13	1	tansig	trainlm	0,0051
11	14	1	tansig	trainlm	0,008
12	15	1	tansig	trainlm	0,0055
13	16	1	tansig	trainlm	0,0047
14	17	1	tansig	trainlm	0,0061
15	18	1	tansig	trainlm	0,004
16	19	1	tansig	trainlm	0,0069
17	20	1	tansig	trainlm	0,006
18	21	1	tansig	trainlm	0,0054
19	22	1	tansig	trainlm	0,0036
20	23	1	tansig	trainlm	0,0043
21	24	1	tansig	trainlm	0,0039
22	25	1	tansig	trainlm	0,0037
23	26	1	tansig	trainlm	0,0034
24	27	1	tansig	trainlm	0,004
25	28	1	tansig	trainlm	0,0059
26	29	1	tansig	trainlm	0,0064
27	30	1	tansig	trainlm	0,0084
28	31	1	tansig	trainlm	0,0073
29	32	1	tansig	trainlm	0,0075
30	33	1	tansig	trainlm	0,0076
31	34	1	tansig	trainlm	0,0086
32	35	1	tansig	trainlm	0,0099
MSE minimum					0,0031

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4.1 Pengaruh Jumlah *Neuron* terhadap Nilai *Mean Square Error* (MSE)

Setelah ditentukan jumlah *neuron* yang menghasilkan nilai MSE terkecil, kemudian dibuat kembali jaringan dengan menambahkan jumlah *hidden layer* pada jumlah *neuron* tetap sebanyak 12. Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah nilai MSE terkecil dapat tercapai dengan menggunakan *hidden layer* yang lebih banyak. Tabel 4.4 menunjukkan 5 kombinasi jaringan dengan penambahan jumlah *hidden layer* pada jumlah *neuron* yang sama.

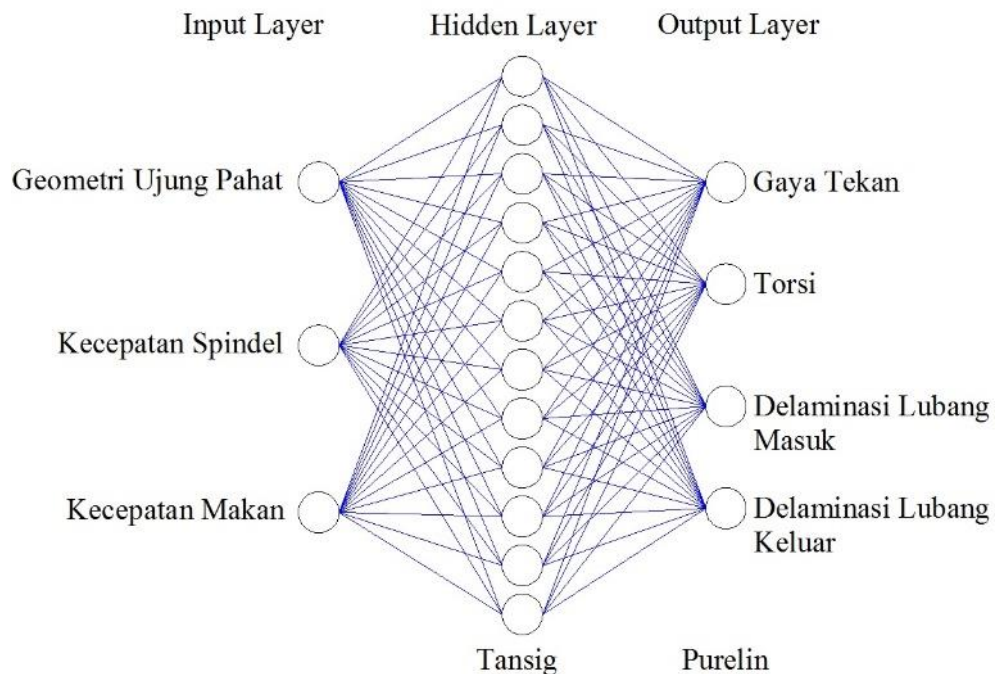
Tabel 4.4 Kombinasi Parameter BPNN untuk Penentuan Jumlah *Hidden Layer*

Jaringan Ke	Jumlah Neuron	Jumlah Hidden Layer	Fungsi Aktivasi	Fungsi Pelatihan	MSE
1	12	1	tansig	trainlm	0,0031
2	12	2	tansig	trainlm	0,0039
3	12	3	tansig	trainlm	0,0051
4	12	4	tansig	trainlm	0,0126
5	12	5	tansig	trainlm	0,0190
MSE minimum					0,0031

Sumber: Hasil Perhitungan

Nilai MSE terkecil dicapai saat jumlah *hidden layer* yang digunakan adalah sebanyak satu seperti ditunjukkan pada Tabel 4.4, sehingga jumlah *hidden layer* yang digunakan untuk prediksi BPNN adalah sebanyak satu.

Hasil perhitungan untuk menentukan aritektur jaringan BPNN menunjukkan bahwa nilai MSE terkecil dapat dicapai dengan 12 *neuron*, 1 *hidden layer*, fungsi aktivasi pada *hidden layer* adalah tansig, *output layer* adalah purelin dan fungsi pelatihan trainlm. Arsitektur jaringan yang tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Arsitektur Jaringan BPNN

4.2.3 Penentuan Kriteria Pemberhentian BPNN

Proses pelatihan BPNN akan dihentikan apabila salah satu kriteria pemberhentian telah tercapai. Kriteria pemberhentian BPNN adalah sebagai berikut:

- Jumlah *epoch* maksimum sebesar 10.000.
- Waktu iterasi maksimum sebesar 200 detik.
- Nilai performa maksimum sebesar 10^{-4}
- Nilai gradien maksimum sebesar 10^{-5}

4.2.4 Data Prediksi BPNN

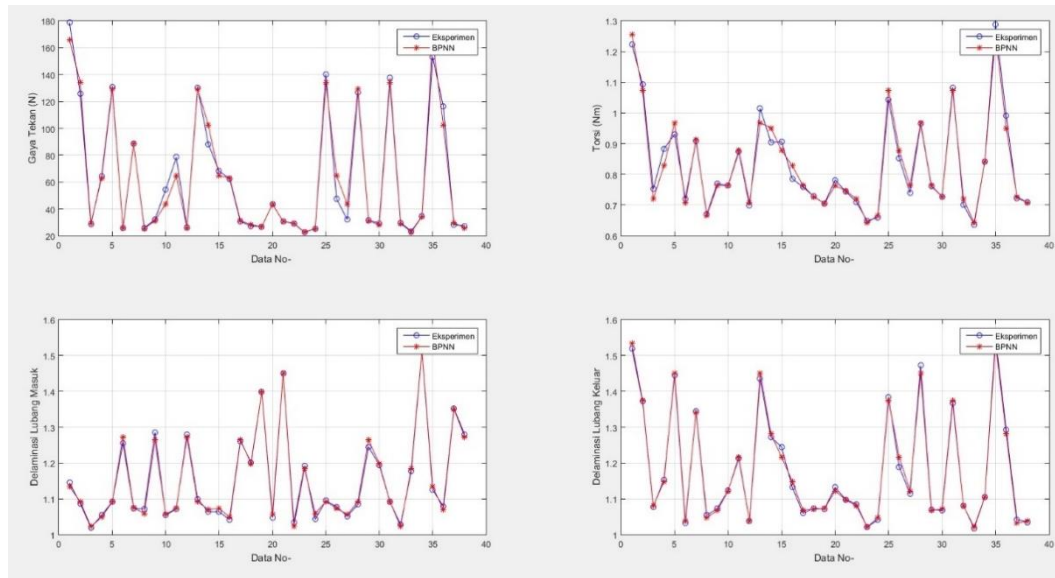
Data yang digunakan untuk memprediksi nilai respon dengan menggunakan metode BPNN terdiri dari data *training*, *testing* dan validasi. Data yang digunakan untuk *training*, *testing* dan validasi berturut-turut adalah sebanyak 70%, 15% dan 15% dari jumlah data hasil eksperimen. Data yang digunakan sebagai data *training* sebanyak 38 data yang ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Data *Training*

No	No. Data	Gaya Tekan			Torsi			Del. Lubang Masuk			Del. Lubang Keluar		
		Eks.	Pred.	Error (%)	Eks.	Pred.	Error (%)	Eks.	Pred.	Error (%)	Eks.	Pred.	Error (%)
1	2	178.60	165.76	7.19	1.224	1.255	-2.566	1.145	1.134	0.970	1.520	1.533	-0.884
2	5	125.60	134.27	-6.91	1.093	1.073	1.862	1.087	1.092	-0.482	1.372	1.375	-0.230
3	8	28.47	29.31	-2.94	0.752	0.720	4.296	1.020	1.023	-0.268	1.078	1.080	-0.213
4	9	64.55	63.03	2.36	0.883	0.828	6.263	1.054	1.048	0.537	1.154	1.148	0.498
5	10	130.70	129.12	1.21	0.931	0.968	-4.007	1.092	1.092	0.043	1.445	1.451	-0.428
6	11	25.63	25.92	-1.13	0.721	0.708	1.854	1.256	1.272	-1.312	1.032	1.038	-0.582
7	12	88.47	88.58	-0.13	0.908	0.914	-0.570	1.074	1.075	-0.118	1.344	1.341	0.198
8	13	25.90	25.42	1.86	0.670	0.666	0.593	1.072	1.059	1.172	1.054	1.047	0.674
9	16	32.10	31.33	2.39	0.771	0.764	0.981	1.285	1.264	1.639	1.074	1.068	0.518
10	17	54.30	43.57	19.76	0.763	0.763	-0.084	1.054	1.056	-0.204	1.123	1.122	0.060
11	18	78.49	64.66	17.62	0.873	0.878	-0.550	1.072	1.074	-0.190	1.213	1.217	-0.318
12	19	26.14	25.92	0.85	0.699	0.708	-1.335	1.280	1.272	0.587	1.038	1.038	-0.001
13	20	130.20	129.12	0.83	1.015	0.968	4.600	1.099	1.092	0.680	1.435	1.451	-1.128
14	22	88.26	102.36	-15.97	0.905	0.951	-5.111	1.064	1.070	-0.576	1.272	1.281	-0.693
15	23	68.22	64.66	5.22	0.907	0.878	3.207	1.064	1.074	-0.943	1.245	1.217	2.260
16	25	62.33	63.03	-1.12	0.786	0.828	-5.344	1.042	1.048	-0.609	1.132	1.148	-1.435
17	27	30.51	31.33	-2.70	0.759	0.764	-0.638	1.261	1.264	-0.213	1.060	1.068	-0.773
18	28	27.43	28.11	-2.46	0.728	0.728	0.064	1.202	1.199	0.274	1.074	1.071	0.232
19	29	26.91	26.89	0.07	0.705	0.705	0.051	1.398	1.398	0.009	1.072	1.073	-0.049
20	30	43.49	43.57	-0.19	0.782	0.763	2.349	1.048	1.056	-0.778	1.132	1.122	0.855
21	31	30.67	30.75	-0.25	0.745	0.747	-0.383	1.450	1.451	-0.047	1.098	1.097	0.053
22	32	29.08	29.31	-0.78	0.709	0.720	-1.465	1.034	1.023	1.090	1.085	1.080	0.434
23	33	22.56	22.72	-0.69	0.648	0.643	0.872	1.192	1.185	0.552	1.021	1.021	-0.020
24	35	25.22	25.42	-0.78	0.660	0.666	-0.899	1.043	1.059	-1.576	1.042	1.047	-0.470
25	36	140.20	134.27	4.23	1.044	1.073	-2.744	1.095	1.092	0.252	1.384	1.375	0.639
26	37	47.51	64.66	-36.09	0.853	0.878	-2.955	1.078	1.074	0.368	1.189	1.217	-2.343
27	38	32.10	43.57	-35.74	0.740	0.763	-3.154	1.052	1.056	-0.395	1.114	1.122	-0.747
28	42	126.60	129.12	-1.99	0.964	0.968	-0.436	1.084	1.092	-0.694	1.472	1.451	1.414
29	43	31.56	31.33	0.72	0.762	0.764	-0.238	1.245	1.264	-1.521	1.070	1.068	0.169
30	44	29.40	28.11	4.40	0.727	0.728	-0.093	1.195	1.199	-0.310	1.068	1.071	-0.305
31	45	137.40	134.27	2.28	1.083	1.073	0.956	1.092	1.092	-0.022	1.367	1.375	-0.596
32	46	29.76	29.31	1.53	0.701	0.720	-2.666	1.028	1.023	0.512	1.081	1.080	0.065
33	47	23.41	22.72	2.97	0.637	0.643	-0.946	1.178	1.185	-0.630	1.018	1.021	-0.315
34	48	34.45	34.36	0.25	0.843	0.842	0.073	1.512	1.512	-0.019	1.105	1.106	-0.055
35	49	153.00	165.76	-8.34	1.287	1.255	2.455	1.125	1.134	-0.791	1.548	1.533	0.909
36	50	116.30	102.36	11.99	0.991	0.951	4.070	1.079	1.070	0.822	1.293	1.281	0.942
37	51	28.22	29.62	-4.96	0.723	0.727	-0.606	1.352	1.350	0.127	1.043	1.033	0.955
38	53	27.30	25.92	5.06	0.709	0.708	0.117	1.279	1.272	0.509	1.035	1.038	-0.290
Rata-Rata Error				-0.80				-0.056				-0.041	-0.026

Sumber: Hasil Perhitungan

Testing dan validasi dilakukan dengan menggunakan 8 data, seperti ditunjukkan yang ditunjukkan Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 secara berurutan. Hasil prediksi nilai respon dengan metode BPNN menghasilkan nilai *mean square error* (MSE) sebesar 0,0037.



Gambar 4.3 Perbandingan Nilai Respon Hasil Eksperimen dengan Nilai Respon Hasil Prediksi BPNN untuk Data *Training*

Tabel 4.6 Data *Testing*

No	No. Data	Gaya Tekan			Torsi			Del. Lubang Masuk			Del. Lubang Keluar		
		Eks.	Pred.	Error (%)	Eks.	Pred.	Error (%)	Eks.	Pred.	Error (%)	Eks.	Pred.	Error (%)
1	3	101.55	102.36	-0.79	0.897	0.951	-6.002	1.073	1.070	0.267	1.286	1.281	0.403
2	4	24.22	22.72	6.21	0.639	0.643	-0.571	1.158	1.185	-2.368	1.014	1.021	-0.711
3	6	28.50	28.11	1.39	0.737	0.728	1.204	1.189	1.199	-0.816	1.070	1.071	-0.118
4	7	32.74	34.36	-4.96	0.849	0.842	0.808	1.523	1.512	0.704	1.124	1.106	1.636
5	14	29.87	29.62	0.84	0.735	0.727	1.019	1.383	1.350	2.331	1.048	1.033	1.474
6	15	28.30	26.89	4.98	0.698	0.705	-0.951	1.379	1.398	-1.368	1.086	1.073	1.241
7	39	86.87	88.58	-1.97	0.893	0.914	-2.316	1.078	1.075	0.254	1.365	1.341	1.733
8	54	63.48	63.03	0.71	0.870	0.828	4.895	1.046	1.048	-0.224	1.149	1.148	0.065
Rata-Rata Error				0.80			-0.239			-0.153			0.716

Sumber: Hasil Perhitungan

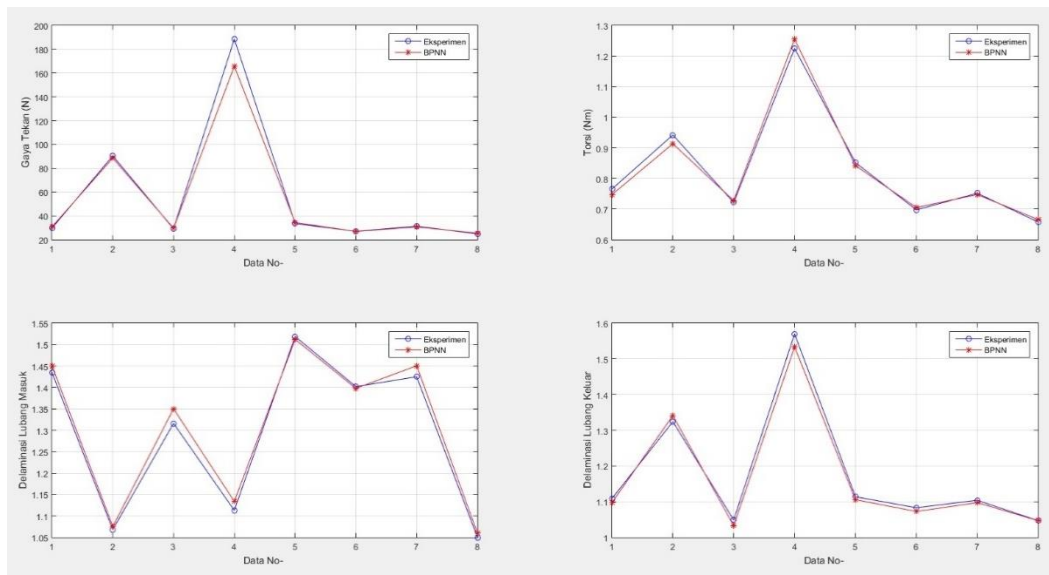
Grafik perbandingan nilai respon hasil eksperimen dengan *output* prediksi BPNN untuk data *training* ditunjukkan pada Gambar 4.3, sedangkan untuk data *testing* dan validasi ditunjukkan pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 secara berurutan. Nilai error rata-rata untuk respon gaya tekan, torsi, delaminasi lubang keluar dan delaminasi lubang masuk pada data *training*, *testing* dan *validasi* memiliki nilai error positif dan negatif. Nilai error negatif terjadi apabila nilai hasil prediksi BPNN lebih

besar dari pada nilai hasil eksperimen, sedangkan nilai eror positif terjadi apabila nilai hasil prediksi lebih kecil dari pada nilai hasil eksperimen. Nilai rata-rata eror untuk respon gaya tekan adalah sebesar 0,8%, torsi adalah sebesar 0,19%, delaminasi lubang masuk adalah sebesar -1,025% dan delaminasi lubang masuk adalah sebesar 0,739% pada data validasi. Nilai eror yang kecil ini menunjukkan bahwa prediksi nilai respon hasil dari proses BPNN sudah baik.

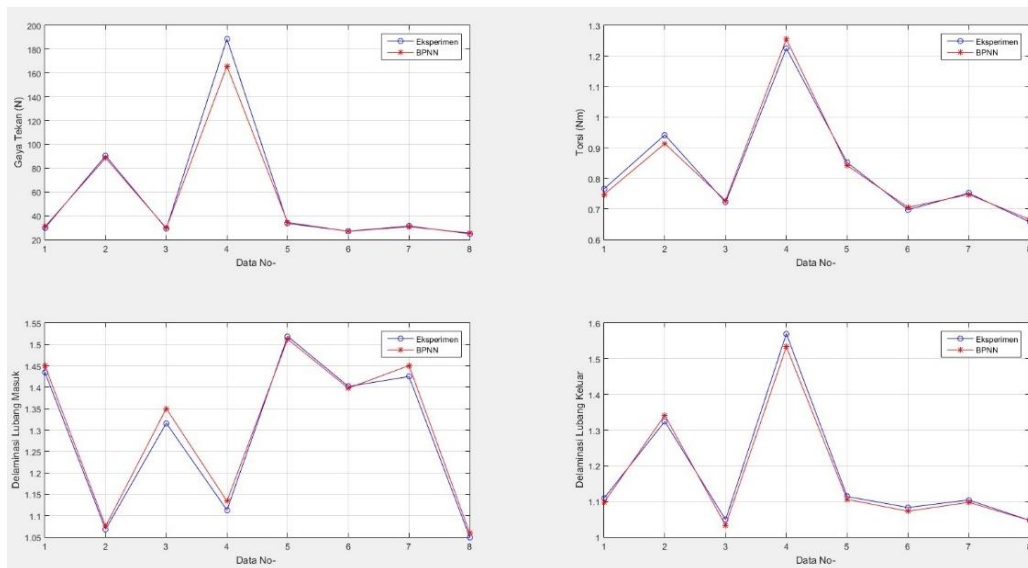
Tabel 4.7 Data Validasi

No	No. Data	Gaya Tekan			Torsi			Del. Lubang Masuk			Del. Lubang Keluar		
		Eks.	Pred.	Error (%)	Eks.	Pred.	Error (%)	Eks.	Pred.	Error (%)	Eks.	Pred.	Error (%)
1	1	29.69	30.75	-3.56	0.766	0.747	2.371	1.435	1.451	-1.093	1.109	1.097	1.044
2	21	90.44	88.58	2.05	0.942	0.914	3.037	1.068	1.075	-0.680	1.324	1.341	-1.310
3	24	29.15	29.62	-1.61	0.722	0.727	-0.806	1.316	1.350	-2.585	1.049	1.033	1.545
4	26	188.6	165.76	12.11	1.225	1.255	-2.482	1.113	1.134	-1.878	1.570	1.533	2.329
5	34	33.52	34.36	-2.52	0.852	0.842	1.157	1.519	1.512	0.442	1.114	1.106	0.731
6	40	27	26.89	0.41	0.697	0.705	-1.116	1.402	1.398	0.295	1.083	1.073	0.968
7	41	31.3	30.75	1.77	0.752	0.747	0.582	1.425	1.451	-1.802	1.104	1.097	0.596
8	52	24.85	25.42	-2.29	0.658	0.666	-1.221	1.050	1.059	-0.898	1.047	1.047	0.010
Rata-Rata Error				0.80			0.190			-1.025			0.739

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 4.4 Perbandingan Nilai Respon Hasil Eksperimen dengan Nilai Respon Hasil Prediksi BPNN untuk Data *Testing*



Gambar 4.5 Perbandingan Nilai Respon Hasil Eksperimen dengan Nilai Respon Hasil Prediksi BPNN untuk Data Validasi

4.3 Metode Optimasi *Particle Swarm Optimization* (PSO)

PSO merupakan metode optimasi yang digunakan untuk menentukan pengaturan parameter-parameter proses yang menghasilkan nilai respon optimum. Perhitungan untuk optimasi PSO dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Matlab seri R2015a. Langkah-langkah optimasi PSO adalah sebagai berikut.

4.3.1 Penentuan Fungsi *Fitness*.

Fungsi *fitness* digunakan untuk mengukur tingkat kesesuaian suatu solusi dengan solusi yang dicari. Fungsi *fitness* bisa berhubungan langsung dengan dengan fungsi tujuan, atau bisa juga dengan modifikasi terhadap suatu fungsi tujuan. Sejumlah solusi yang dibangkitkan pada suatu populasi akan dievaluasi dengan menggunakan fungsi *fitness* (Santosa, 2011). Pada penelitian ini, fungsi *fitness* didapatkan dengan cara menggabungkan 4 fungsi objektif (*objective function*) yang didapat dari prediksi BPNN menjadi 1 fungsi *fitness*. Fungsi aktivasi yang digunakan untuk menentukan masing-masing fungsi objektif adalah *hyperbolic tangent sigmoid transfer function* (tansig), dengan persamaan yang digunakan adalah $\frac{2}{1+e^{-2x}} - 1$. Fungsi objektif dari masing-masing respon didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Obj_k = \left(\sum_{j=1}^{12} v_{jk} \cdot \left(\left(\frac{2}{1 + e^{-2z}} \right) - 1 \right) \right) + v0_k \quad (4.2)$$

$$z = \left(\sum_{j=1}^{12} (u_{ij} \cdot x_i) \right) + u0_j \quad (4.3)$$

Dengan:

Obj_k = respon dari eksperimen yaitu gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar.

i = jumlah parameter proses

j = jumlah *neuron* pada *hidden layer*

k = jumlah parameter respon

u = nilai bobot dari dari *input layer* ke *hidden layer*.

v = nilai bobot dari dari *hidden layer* ke *output layer*.

$u0$ = nilai bias dari dari *input layer* ke *hidden layer*.

$v0$ = nilai bias dari dari *hidden layer* ke *output layer*.

z = nilai aktivasi masing-masing *neuron* pada *hidden layer*.

Setelah didapatkan fungsi objektif, maka dilakukan penggabungan empat fungsi objektif menjadi satu fungsi *fitness* seperti ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\text{minimize } f(x) = Obj_1 + Obj_2 + Obj_3 + Obj_4 \quad (4.5)$$

Dengan:

Obj_1 = gaya tekan.

Obj_2 = torsi.

Obj_3 = delaminasi lubang masuk.

Obj_4 = delaminasi lubang keluar.

4.3.2 Penentuan Batas Atas dan Batas Bawah Parameter Proses.

Pengaturan parameter proses yang didapat dari hasil optimasi dengan menggunakan metode PSO perlu dibatasi, agar tidak berada diluar nilai interval parameter proses penelitian. Nilai batas bawah dan batas atas interval dari parameter-parameter proses penggurdian yang ingin dicapai ditunjukkan pada

Tabel 4.8. Parameter proses geometri ujung pahat *x type* diubah menjadi 1 dan 2 untuk *brad & spur*.

Tabel 4.8 Nilai Batas Bawah dan Batas Atas Interval

Parameter Proses	Unit	Batas		Interval
		Bawah	Atas	
Geometri ujung pahat	-	1	2	1
Kecepatan spindel	rpm	1000	3000	1000
Kecepatan makan	mm/menit	50	250	100

Sumber: Hasil Perhitungan

4.3.3 Penentuan Parameter Parameter Optimasi PSO:

Parameter PSO perlu ditetapkan dengan baik agar nilai optimum dapat tercapai. Parameter-parameter yang digunakan pada optimasi PSO adalah sebagai berikut:

- Jumlah partikel = 100
- Jumlah iterasi maksimum = 1000

Proses optimasi PSO akan dihentikan apabila salah satu kriteria pemberhentian telah tercapai. Kriteria pemberhentian PSO adalah sebagai berikut

- Mencapai jumlah iterasi maksimum sebesar 1000 iterasi.
- Variasi nilai $P_{best,j} < 10^{-8}$

4.4 Hasil Optimasi PSO

Penentuan parameter proses yang menghasilkan respon yang optimal dilakukan dengan beberapa kali percobaan. Hal ini disebabkan oleh optimasi PSO yang sering kali terjebak pada *local optimum*, sehingga harus dicari *global optimum* untuk mendapatkan pengaturan parameter proses yang menghasilkan nilai respon yang minimum. Pengaturan parameter proses yang didapatkan dari optimasi PSO dan nilai respon yang diprediksi dengan menggunakan BPNN ditunjukkan pada Tabel 4.9. Pengaturan parameter proses yang dipilih adalah pengaturan parameter proses yang menghasilkan nilai *fitness* yang paling kecil, sehingga akan menghasilkan nilai respon yang minimum.

Optimasi multi respon dengan menggunakan metode PSO menghasilkan geometri ujung pahat adalah *x type*, kecepatan spindel sebesar 2993 rpm dan kecepatan makan sebesar 79 mm/menit. Pengaturan parameter proses ini kemudian digunakan sebagai *input* untuk prediksi nilai respon dengan menggunakan metode BPNN. Hasil prediksi nilai respon dengan menggunakan BPNN menghasilkan gaya tekan sebesar 22,99 N, torsi sebesar 0,634 Nm, delaminasi lubang masuk sebesar 1,132 dan delaminasi lubang keluar sebesar 1,0287.

Tabel 4.9 Parameter Proses Terpilih dari Optimasi PSO dan Prediksi Respon

Parameter Proses			Prediksi Respon			
Geometri Ujung Pahat	Kecepatan Spindel (rpm)	Kecepatan Makan (mm/min)	Gaya Tekan (N)	Torsi (Nm)	Delaminasi Lubang Masuk	Delaminasi Lubang Keluar
<i>X type</i>	2993	79	22,99	0,634	1,132	1,028

Sumber: Hasil Perhitungan

4.5 Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi dilakukan untuk membandingkan nilai respon hasil prediksi BPNN dengan hasil eksperimen. Eksperimen konfirmasi direplikasi sebanyak lima kali pada mesin CNC *drill & tapping machine*. Pengaturan parameter proses pada eksperimen konfirmasi sesuai dengan hasil optimasi yang dilakukan menggunakan metode PSO. Pengaturan kecepatan spindel dan kecepatan makan pada mesin CNC *drill & tapping machine* tidak dapat menggunakan bilangan fraksional, sehingga dilakukan pembulatan untuk pengaturan kedua parameter tersebut. Parameter proses yang digunakan untuk eksperimen konfirmasi yaitu geometri ujung pahat adalah *x type*, kecepatan spindel sebesar 2993 rpm dan kecepatan makan sebesar 79 mm/menit. Pengukuran gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar dilakukan pada setiap replikasi. Hasil eksperimen konfirmasi ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Data hasil eksperimen konfirmasi menunjukkan bahwa nilai rata-rata respon yang dicapai adalah gaya tekan sebesar 22,12 N, torsi sebesar 0,636 Nm, delaminasi lubang masuk sebesar 1,130 dan delaminasi lubang keluar sebesar 1,034.

Tabel 4.10 Hasil Eksperimen Konfirmasi

Parameter Proses			Respon Hasil Eksperimen			
Geometri Ujung Pahat	Kecepatan Spindel (rpm)	Kecepatan Makan (mm/min)	Gaya Tekan (N)	Torsi (Nm)	Delaminasi Lubang Masuk	Delaminasi Lubang Keluar
<i>X type</i>	2993	79	20,56	0,644	1,125	1,052
			23,41	0,631	1,148	1,023
			22,84	0,621	1,089	1,018
			21,65	0,648	1,135	1,043
			22,12	0,634	1,154	1,034
Rata-Rata			22,12	0,636	1,130	1,034

Sumber: Hasil Pengukuran

Nilai respon dari hasil eksperimen konfirmasi selanjutnya dibandingkan dengan nilai respon hasil prediksi BPNN. Perbandingan antara nilai respon hasil eksperimen konfirmasi dengan nilai respon hasil prediksi BPNN ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Perbandingan Nilai Respon Hasil Eksperimen Konfirmasi dan Prediksi BPNN

Gaya Tekan (N)		Torsi (Nm)		Delaminasi Lubang Masuk		Delaminasi Lubang Keluar	
Prediksi BPNN	Eksperimen Konfirmasi	Prediksi BPNN	Eksperimen Konfirmasi	Prediksi BPNN	Eksperimen Konfirmasi	Prediksi BPNN	Eksperimen Konfirmasi
22,99	20,56	0,634	0,644	1,132	1,125	1,028	1,052
	23,41		0,631		1,148		1,023
	22,84		0,621		1,089		1,018
	21,65		0,648		1,135		1,043
	22,12		0,634		1,154		1,034

Sumber: Hasil Perhitungan dan Pengukuran

4.6 Pengujian Kesamaan Rata-Rata Hasil Eksperimen Konfirmasi dengan Hasil Prediksi BPNN-PSO

Pengujian kesamaan rata-rata antara hasil eksperimen konfirmasi dengan hasil prediksi BPNN-PSO dilakukan dengan menggunakan metode statistik uji rata-rata *one sample t-test*. Pengujian ini bertujuan untuk menguji apakah hasil eksperimen konfirmasi sesuai atau sama dengan hasil prediksi BPNN-PSO.

4.6.1 Pengujian *one sample t-test* untuk respon gaya tekan.

- $H_0: \mu = \mu_0$
 $H_1: \mu \neq \mu_0$
 $\mu_0 = 22,99$
- Kriteria penolakan adalah:
Tolak H_0 , jika nilai $P_{value} < \alpha$, dengan $\alpha = 0,05$
- Hasil: $P_{value} = 0,150$
- Kesimpulan: $P_{value} = 0,150 > 0,05$, yang berarti H_0 gagal ditolak, sehingga nilai rata-rata gaya tekan hasil eksperimen konfirmasi sama dengan nilai gaya tekan hasil prediksi BPNN-PSO.

4.6.2 Pengujian *one sample t-test* untuk respon torsi.

- $H_0: \mu = \mu_0$
 $H_1: \mu \neq \mu_0$
 $\mu_0 = 0,634$
- Kriteria penolakan adalah:
Tolak H_0 , jika nilai $P_{value} < \alpha$, dengan $\alpha = 0,05$
- Hasil: $P_{value} = 0,756$
- Kesimpulan: $P_{value} = 0,756 > 0,05$, yang berarti H_0 gagal ditolak, sehingga nilai rata-rata torsi hasil eksperimen konfirmasi sama dengan nilai torsi hasil prediksi BPNN-PSO.

4.6.3 Pengujian *one sample t-test* untuk respon delaminasi lubang masuk.

- $H_0: \mu = \mu_0$
 $H_1: \mu \neq \mu_0$
 $\mu_0 = 1,132$
- Kriteria penolakan adalah:
Tolak H_0 , jika nilai $P_{value} < \alpha$, dengan $\alpha = 0,05$
- Hasil: $P_{value} = 0,883$
- Kesimpulan: $P_{value} = 0,883 > 0,05$, yang berarti H_0 gagal ditolak, sehingga nilai rata-rata delaminasi lubang masuk hasil eksperimen konfirmasi sama dengan nilai delaminasi lubang masuk hasil prediksi BPNN-PSO.

4.6.4 Pengujian *one sample t-test* untuk respon delaminasi lubang keluar.

- $H_0: \mu = \mu_0$
 $H_1: \mu \neq \mu_0$

$$\mu_0 = 1,028$$

- Kriteria penolakan adalah:
Tolak H_0 , jika nilai $P_{value} < \alpha$, dengan $\alpha = 0,05$
- Hasil: $P_{value} = 0,392$
- Kesimpulan: $P_{value} = 0,392 > 0,05$, yang berarti H_0 gagal ditolak, sehingga nilai rata-rata delaminasi lubang keluar hasil eksperimen konfirmasi sama dengan nilai delaminasi lubang keluar hasil prediksi BPNN-PSO.

Berdasarkan pengujian *one sample t-test* untuk respon gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar, dapat disimpulkan bahwa nilai prediksi hasil BPNN sama dengan nilai rata-rata hasil eksperimen konfirmasi untuk semua respon.

4.7 Pengaruh Parameter Proses Terhadap Nilai Respon

Data hasil eksperimen sesuai dengan rancangan percobaan faktorial $2 \times 3 \times 3$, ditunjukkan pada Tabel 4.12. Pengaruh parameter proses terhadap masing-masing nilai respon dapat dijelaskan sebagai berikut.

4.7.1 Pengaruh Parameter Proses Terhadap Gaya Tekan

Pengaruh kecepatan spindel dengan variasi kecepatan makan terhadap gaya tekan ditunjukkan pada Gambar 4.6. Pada Gambar 4.6 ditunjukkan bahwa penggunaan geometri ujung pahat *x type* akan menurunkan besarnya gaya tekan jika dibandingkan dengan geometri ujung pahat *brad & spur*. Hal ini disebabkan oleh ujung pahat *x type* yang lebih pendek, dengan sisi potong yang lebih panjang jika dibandingkan dengan ujung pahat dan sisi potong dari pahat *brad & spur*. Oleh karena itu, kemampuan penetrasi pahat *x type* lebih baik jika dibandingkan dengan pahat *brad & spur*.

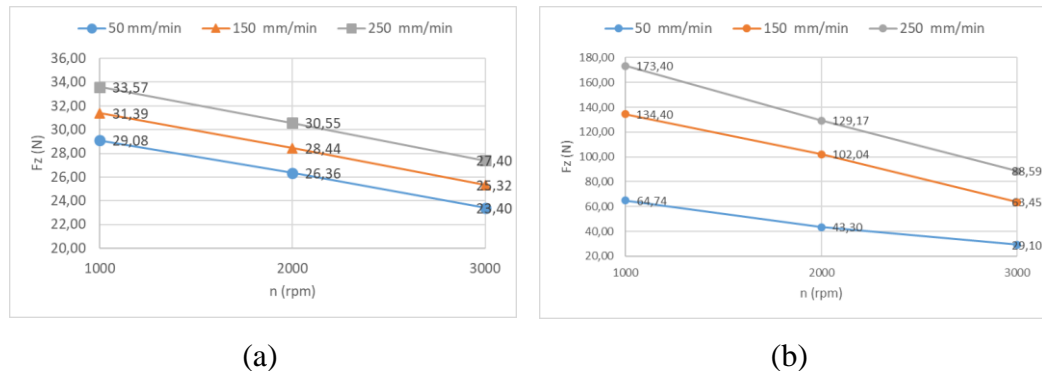
Gambar 4.6 (a) menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan spindel akan menurunkan besarnya gaya tekan pada proses penggurdian dengan menggunakan pahat *x type*. Peningkatan kecepatan spindel juga akan menurunkan besarnya gaya tekan pada proses penggurdian dengan menggunakan pahat *brad & spur* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6 (b). Peningkatan kecepatan spindel akan meningkatkan gesekan antara pahat gurdi dengan material CFRP, sehingga

Tabel 4.12 Data Hasil Eksperimen Sesuai Dengan Rancangan Percobaan Faktorial 2 x 3 x 3

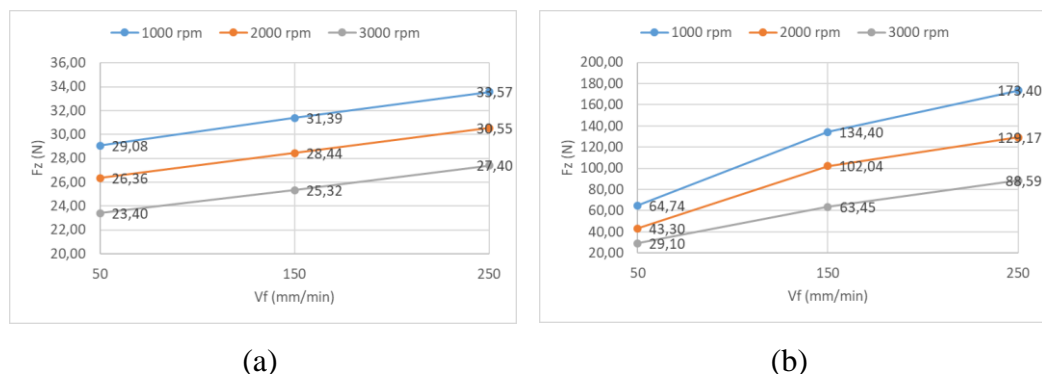
Parameter Proses			Parameter Respon											
Geometri Ujung Pahat	Kecepatan Spindel (rpm)	Kecepatan Makan (mm/min)	Gaya Tekan (N)			Torsi (Nm)			Delaminasi Lubang Masuk			Delaminasi Lubang Keluar		
			Rep.1	Rep.2	Rep.3	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Rep.1	Rep.2	Rep.3
<i>X type</i>	1000	50	29,87	29,15	28,22	0,735	0,722	0,723	1,383	1,316	1,352	1,048	1,049	1,043
		150	32,10	30,51	31,56	0,771	0,759	0,762	1,285	1,261	1,245	1,085	1,082	1,088
		250	32,74	33,52	34,45	0,849	0,852	0,843	1,523	1,519	1,512	1,124	1,114	1,105
	2000	50	25,63	26,14	27,30	0,721	0,699	0,709	1,256	1,280	1,279	1,032	1,038	1,035
		150	28,50	27,43	29,40	0,737	0,728	0,727	1,189	1,202	1,195	1,070	1,069	1,068
		250	29,69	30,67	31,30	0,766	0,745	0,752	1,435	1,450	1,425	1,109	1,098	1,104
	3000	50	24,22	22,56	23,41	0,639	0,648	0,637	1,158	1,192	1,178	1,014	1,021	1,018
		150	25,90	25,22	24,85	0,670	0,660	0,658	1,072	1,043	1,050	1,054	1,042	1,047
		250	28,30	26,91	27,00	0,698	0,705	0,697	1,379	1,398	1,402	1,086	1,072	1,083
<i>Brad & spur</i>	1000	50	78,49	68,22	47,51	0,873	0,907	0,853	1,072	1,064	1,078	1,213	1,245	1,189
		150	125,60	140,20	137,40	1,093	1,044	1,083	1,087	1,095	1,092	1,372	1,384	1,367
		250	178,60	188,60	153,00	1,224	1,225	1,287	1,145	1,113	1,125	1,520	1,570	1,548
	2000	50	54,30	43,49	32,10	0,763	0,782	0,740	1,054	1,048	1,052	1,123	1,132	1,114
		150	101,55	88,26	116,30	0,897	0,905	0,991	1,073	1,064	1,079	1,286	1,272	1,293
		250	130,70	130,20	126,60	0,931	1,015	0,964	1,092	1,099	1,084	1,445	1,435	1,472
	3000	50	28,47	29,08	29,76	0,752	0,709	0,701	1,020	1,034	1,028	1,078	1,085	1,081
		150	64,55	62,33	63,48	0,883	0,786	0,870	1,054	1,042	1,046	1,154	1,132	1,149
		250	88,47	90,44	86,87	0,908	0,942	0,893	1,074	1,068	1,078	1,344	1,324	1,365

Sumber: Hasil Pengukuran

meningkatkan temperatur pemotongan. Kenaikan dari temperatur pemotongan ini akan menyebabkan pelunakan material CFRP, karena daya ikat matriks yang semakin menurun dalam mengikat fiber. Hal ini menyebabkan gaya tekan pada proses penggurdian material CFRP akan menurun dengan meningkatnya kecepatan spindel (Haijin, 2016).



Gambar 4.6 Pengaruh Kecepatan Spindel Terhadap Gaya Tekan Dengan Variasi Kecepatan Makan Untuk Geometri Ujung Pahat (a) *X Type* (b) *Brad & Spur*



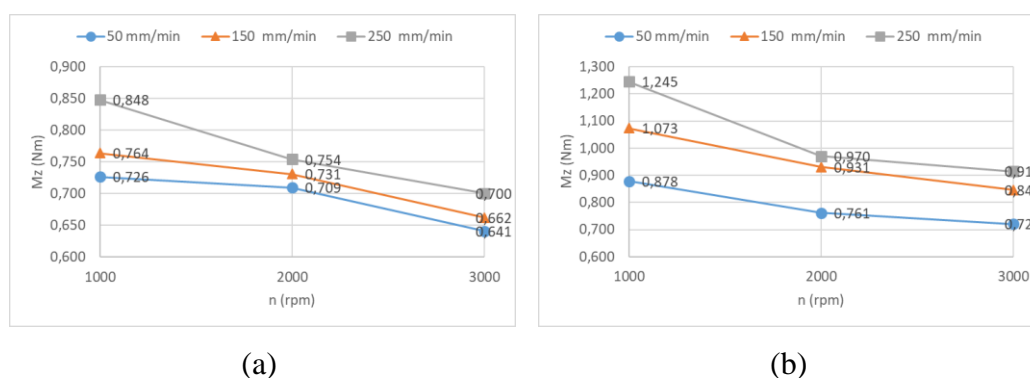
Gambar 4.7 Pengaruh Kecepatan Makan Terhadap Gaya Tekan Dengan Variasi Kecepatan Spindel Untuk Geometri Ujung Pahat (a) *X Type* (b) *Brad & Spur*

Pengaruh kecepatan makan dengan variasi kecepatan spindel terhadap gaya tekan ditunjukkan pada Gambar 4.7. Pada Gambar 4.7 ditunjukkan bahwa penurunan kecepatan makan akan menurunkan nilai gaya tekan pada proses penggurdian CFRP. Hal ini sesuai dengan persamaan empiris untuk menghitung gaya tekan yang terjadi selama proses penggurdian, yang menyatakan bahwa nilai gaya tekan dipengaruhi oleh diameter benda kerja, kecepatan makan dan geometri pahat (Rochim, 1993). Fenomena ini berlaku untuk geometri ujung pahat *x type* dan

brad & spur, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7 (a) dan Gambar 4.7 (b) secara berurutan.

4.7.2 Pengaruh Parameter Proses terhadap Torsi

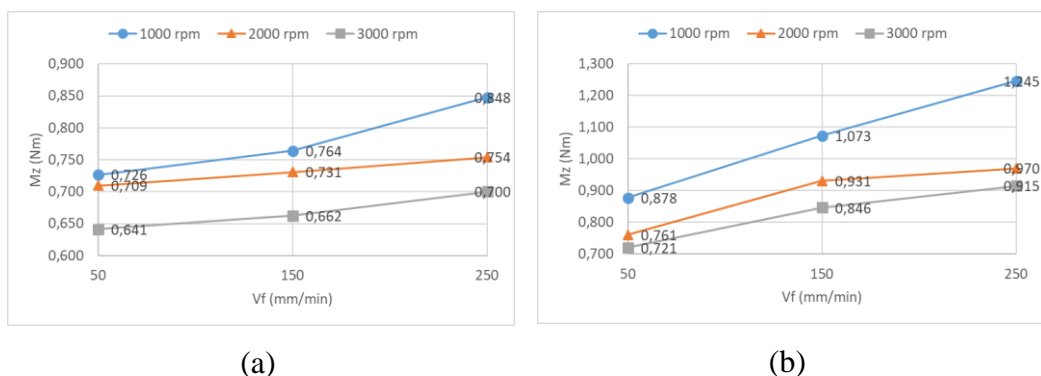
Pengaruh kecepatan spindel dengan variasi kecepatan makan terhadap torsi ditunjukkan pada Gambar 4.8. Pada Gambar 4.8 ditunjukkan bahwa penggunaan geometri ujung pahat *x type* akan menurunkan besarnya torsi pada proses penggurdian, jika dibandingkan dengan penggunaan geometri ujung pahat *brad & spur*. Hal ini disebabkan oleh pemotongan material CFRP pada pahat *x type* berlangsung bertahap mulai dari arah ujung pahat menuju ke sisi potong yang paling luar, sedangkan pada pahat *brad & spur* pemotongan CFRP pada sisi ujung pahat dengan sisi potong yang paling luar berlangsung secara bersamaan. Oleh karena itu, penggunaan geometri ujung pahat *x type* mampu menghasilkan torsi yang lebih kecil pada proses penggurdian.



Gambar 4.8 Pengaruh Kecepatan Spindel Terhadap Torsi Dengan Variasi Kecepatan Makan Untuk Geometri Ujung Pahat (a) *X Type* (b) *Brad & Spur*

Gambar 4.8 (a) menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan spindel akan menurunkan besarnya torsi yang terjadi pada proses penggurdian CFRP dengan menggunakan geometri ujung pahat *x type*. Meningkatnya kecepatan spindel akan meningkatkan temperatur pemotongan. Peningkatan temperatur pemotongan ini akan menyebabkan pelunakan material CFRP, sehingga menyebabkan torsi yang dibutuhkan untuk menjaga pahat gudi tetap berputar akan berkurang (Haijin,

2016). Fenomena ini juga berlaku untuk geometri ujung pahat *brad & spur* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8 (b)



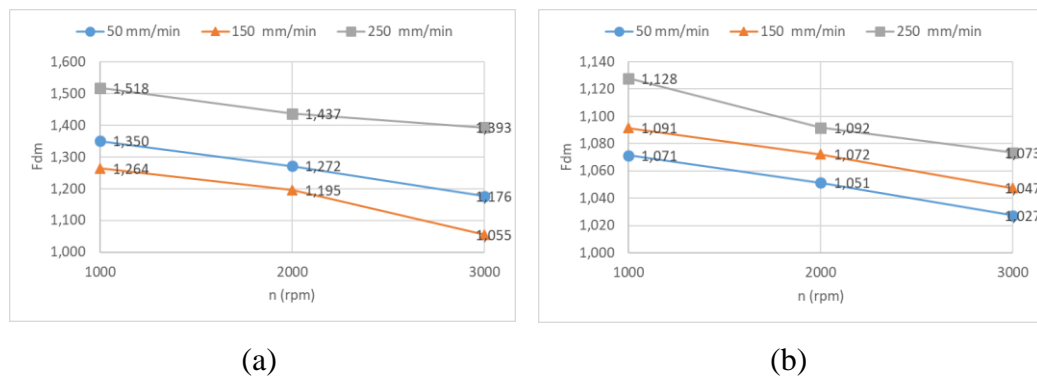
Gambar 4.9 Pengaruh Kecepatan Makan Terhadap Torsi Dengan Variasi Kecepatan Spindel Untuk Geometri Ujung Pahat (a) *X Type* (b) *Brad & Spur*

Pengaruh kecepatan makan dengan variasi kecepatan spindel terhadap torsi ditunjukkan pada Gambar 4.9. Pada Gambar 4.9 ditunjukkan bahwa penurunan kecepatan makan akan menurunkan nilai torsi pada proses penggurdian CFRP. Hal ini sesuai dengan persamaan empiris untuk menghitung torsi yang terjadi selama proses penggurdian, yang menyatakan bahwa nilai torsi dipengaruhi oleh diameter benda kerja, kecepatan makan dan geometri pahat (Rochim, 1993). Fenomena ini berlaku untuk geometri ujung pahat *x type* dan *brad & spur*, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.9 (a) dan Gambar 4.9 (b) secara berurutan.

4.7.3 Pengaruh Parameter Proses Terhadap Delaminasi Lubang Masuk

Mekanisme delaminasi di bagian lubang masuk pada proses penggurdian CFRP disebut sebagai *peel up delamination*. Kontak antara sisi potong pahat gundi dan lapisan komposit di daerah lubang masuk menghasilkan gaya pengupasan pada arah aksial, yang searah dengan kemiringan dari alur (*flute*) pahat gundi. Alur dari pahat potong cenderung menarik lapisan CFRP yang menyebabkan material komposit berputar keatas, sehingga tidak terjadi proses pemotongan. Akibatnya, lapisan komposit pada bagian atas dapat dengan mudah dipisahkan dari bagian yang tidak dipotong, sehingga menyebabkan terjadinya delaminasi pada lubang masuk (Khashaba, 2012).

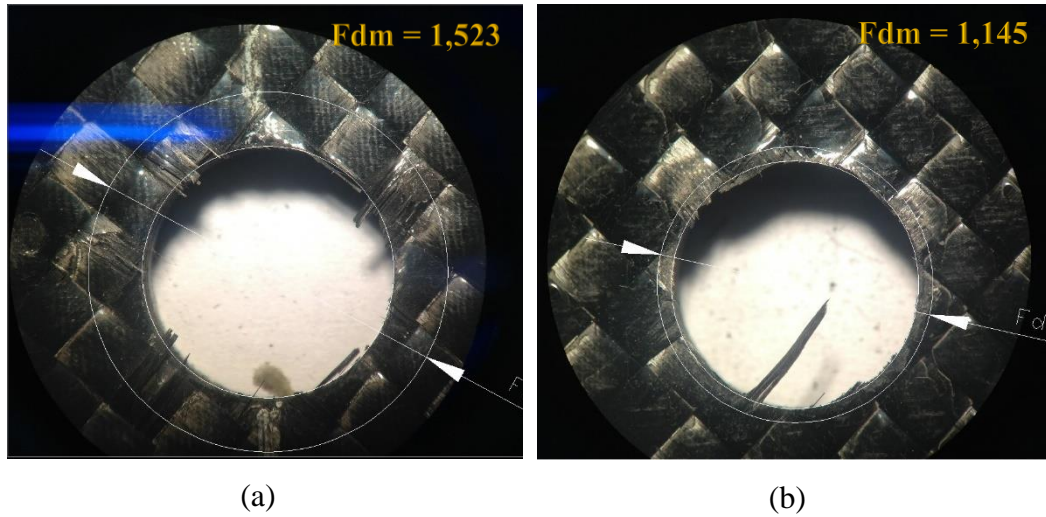
Pengaruh kecepatan spindel dengan variasi kecepatan makan terhadap delaminasi lubang masuk ditunjukkan pada Gambar 4.10. Pada Gambar 4.10 (a) dan Gambar 4.10 (b) ditunjukkan bahwa penggunaan geometri ujung pahat *brad & spur* akan menurunkan besarnya delaminasi lubang masuk pada proses penggurdian, jika dibandingkan dengan geometri ujung pahat *x type*. Delaminasi pada lubang masuk dipengaruhi oleh luas permukaan kontak pahat gurdi (Kumar, 2016). Luas permukaan kontak pada pahat *x type* ditentukan oleh satu titik ujung pahat dan panjang dari dua sisi *chisel edge*, sedangkan pada pahat *brad & spur* hanya dipengaruhi oleh tiga titik ujung pahat tanpa *chisel edge*. Hal ini menyebabkan permukaan ujung pahat *x type* yang kontak dengan permukaan benda kerja lebih luas jika dibandingkan dengan *brad & spur*, sehingga pahat *brad & spur* mampu menghasilkan delaminasi lubang masuk yang lebih kecil seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.11.



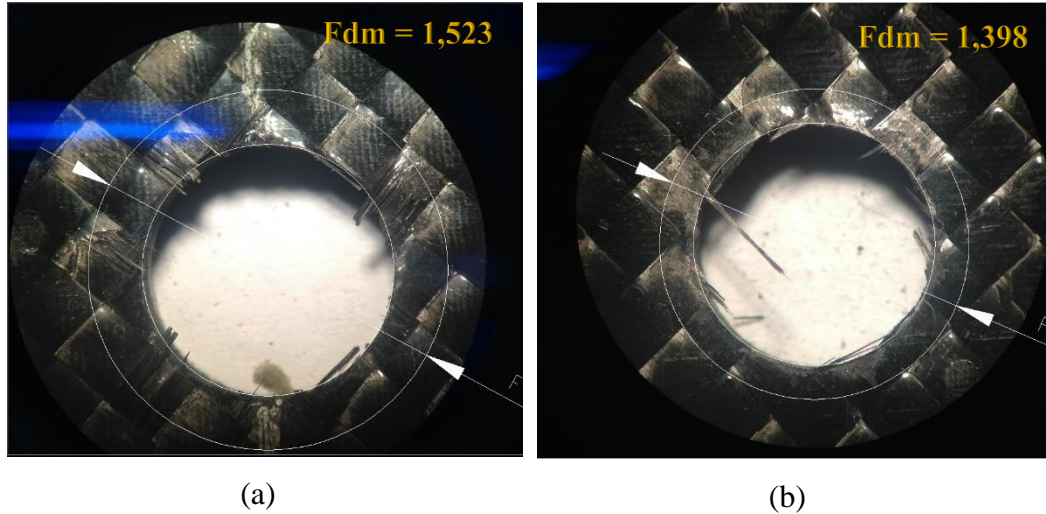
Gambar 4.10 Pengaruh Kecepatan Spindel Terhadap Delaminasi Lubang Masuk Dengan Variasi Kecepatan Makan Untuk Geometri Ujung Pahat (a) *X Type* (b) *Brad & Spur*

Gambar 4.10 (a) menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan spindel akan menurunkan besarnya delaminasi lubang masuk pada proses penggurdian CFRP dengan menggunakan geometri ujung pahat *x type*. Fenomena ini juga berlaku untuk geometri ujung pahat *brad & spur* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.10 (b). Peningkatan kecepatan spindel akan menurunkan gaya tekan yang terjadi pada proses penggurdian (Haijin, 2016). Gaya tekan yang lebih rendah menyebabkan delaminasi lubang masuk menurun (Azmi, 2012), sehingga peningkatan kecepatan

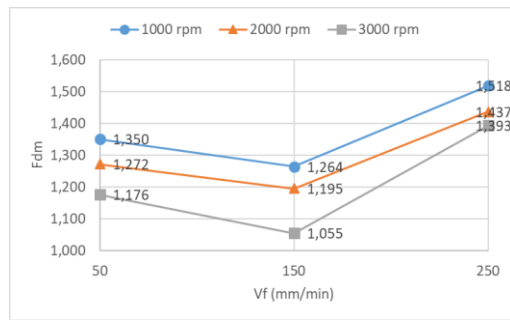
spindel akan menurunkan delaminasi lubang masuk seperti ditunjukkan pada Gambar 4.12.



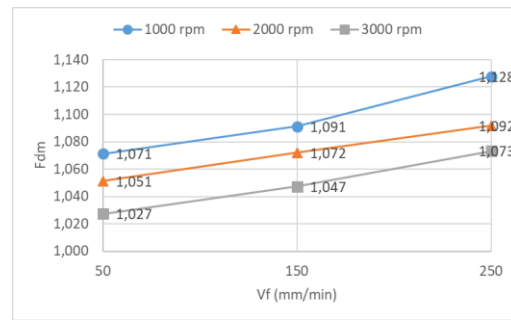
Gambar 4.11 Delaminasi Lubang Masuk untuk (a) Geometri Ujung Pahat *X Type* dan (b) Geometri Ujung Pahat *Brad & Spur* pada Proses Gurdi dengan Kecepatan Spindel 1000 rpm dan Kecepatan Makan 250 mm/min



Gambar 4.12 Delaminasi Lubang Masuk untuk (a) Kecepatan Spindel 1000 rpm dan (b) Kecepatan Spindel 3000 rpm pada Proses Gurdi dengan Geometri Ujung Pahat *X Type* dan Kecepatan Makan 250 mm/min

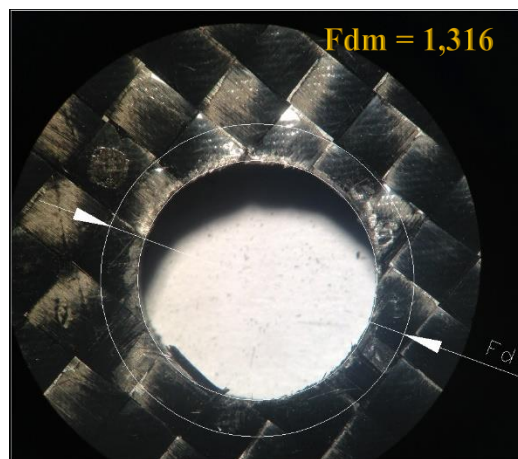


(a)

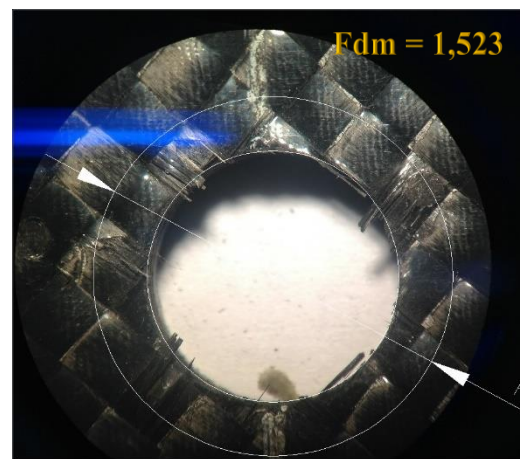


(b)

Gambar 4.13 Pengaruh Kecepatan Makan Terhadap Delaminasi Lubang Masuk Dengan Variasi Kecepatan Spindel Untuk Geometri Ujung Pahat (a) *X Type* (b) *Brad & Spur*



(a)



(b)

Gambar 4.14 Delaminasi Lubang Masuk untuk (a) Kecepatan Makan 50 mm/min dan (b) Kecepatan Makan 250 mm/min pada Proses Gurdi dengan Geometri Ujung Pahat *X Type* dan Kecepatan Spindel 1000 rpm

Pengaruh kecepatan makan dengan variasi kecepatan spindel terhadap delaminasi lubang masuk ditunjukkan pada Gambar 4.13. Pada Gambar 4.13 ditunjukkan bahwa penurunan kecepatan makan akan menurunkan delaminasi lubang masuk pada proses penggurdian CFRP. Fenomena ini berlaku untuk geometri ujung pahat *x type* dan *brad & spur*, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.13 (a) dan Gambar 4.13 (b) secara berurutan. Namun, pada kecepatan makan 150 mm/min untuk geometri ujung pahat *x type* terjadi penurunan delaminasi lubang masuk. Hal ini disebabkan oleh gaya tekan yang dihasilkan pada kecepatan makan 150 mm/min mampu membuat sisi potong pahat gurdi memotong material CFRP

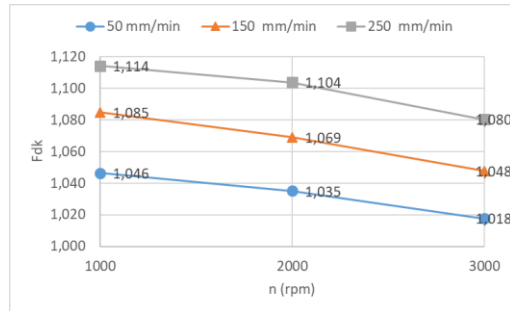
dengan baik, sehingga tidak terjadi gaya pengupasan pada arah aksial. Lebih lanjut, pada kecepatan makan 250 mm/min terjadi peningkatan delaminasi lubang masuk. Hal ini disebabkan oleh gaya tekan yang dihasilkan pada kecepatan makan 250 mm/min membuat lapisan CFRP melengkung ke arah lubang keluar, sehingga menyebabkan terjadinya delaminasi karena serat-serat pada CFRP yang tidak dipotong tertarik ke arah lubang keluar. Penurunan kecepatan makan pada proses gurdi akan menyebabkan menurunnya gaya tekan (Rochim, 1993). Gaya tekan yang lebih rendah akan menyebabkan delaminasi lubang masuk menurun (Azmi, 2012), sehingga penurunan kecepatan makan akan menurunkan delaminasi lubang masuk seperti ditunjukkan pada Gambar 4.14. Gambar delaminasi lubang masuk dengan variasi kombinasi masing-masing parameter proses, secara lengkap ditunjukkan pada Lampiran B.

4.7.4 Pengaruh Parameter Proses Terhadap Delaminasi Lubang Keluar

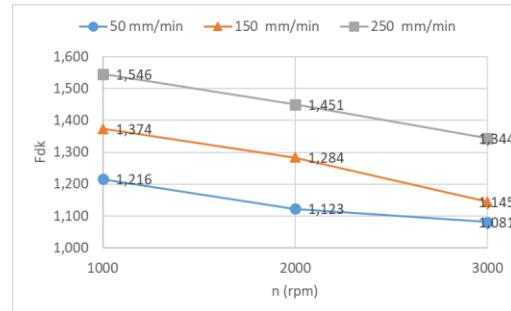
Mekanisme delaminasi di bagian lubang keluar pada proses penggurdian disebut sebagai *push out delamination*. Gaya tekan pada proses penggurdian membuat daerah yang dekat dengan ujung pahat tidak dapat memotong lapisan CFRP. Lapisan CFRP di daerah lubang keluar yang tidak terpotong, kemudian melengkung secara akibat gaya tekan yang diberikan oleh ujung pahat gurdi. Lengkungan ini semakin meningkat ketika ujung pahat gurdi mendekati lapisan CFRP yang terakhir, sehingga menyebabkan peningkatan gaya *bending* pada lapisan CFRP. Pada saat yang bersamaan, peningkatan gaya *bending* pada lapisan CFRP menyebabkan kekuatan ikatan antar lapisan CFRP menurun. Hal ini mengakibatkan timbulnya retakan pada daerah di sekitar lubang. Seiring dengan makin turunnya ujung pahat gurdi, akan semakin melemahkan kekuatan ikatan antar lapisan. Lemahnya kekuatan ikatan ini kemudian menyebabkan retakan yang terjadi semakin menyebar, sehingga terjadi cacat *push out delamination* pada bagian lapisan maupun permukaan CFRP (Kumar, 2016).

Pengaruh kecepatan spindel dengan variasi kecepatan makan terhadap delaminasi lubang keluar ditunjukkan pada Gambar 4.15. Pada Gambar 4.15 (a) dan Gambar 4.15 (b) ditunjukkan bahwa penggunaan geometri ujung pahat *x type* akan menurunkan besarnya delaminasi lubang keluar pada proses penggurdian, jika

dibandingkan dengan geometri ujung pahat *brad & spur*. Ujung pahat *brad & spur* lebih panjang jika dibanding dengan pahat *x type*. Hal ini menyebabkan daerah yang tidak terpotong dan hanya menerima gaya tekan pada saat proses penggurdian semakin luas, sehingga delaminasi lubang keluar pada geometri ujung pahat *x type* lebih rendah daripada pahat *brad & spur* seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.16.

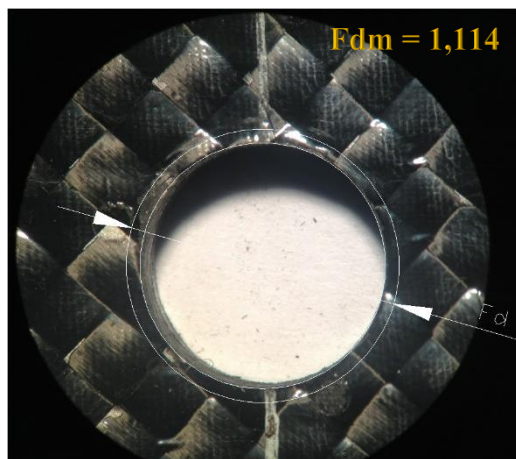


(a)

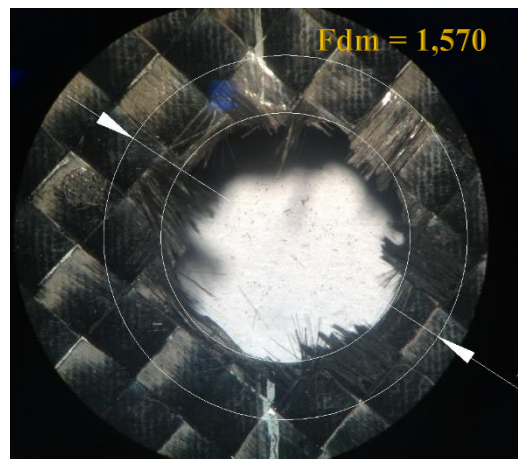


(b)

Gambar 4.15 Pengaruh Kecepatan Spindel Terhadap Delaminasi Lubang Keluar Dengan Variasi Kecepatan Makan Untuk Geometri Ujung Pahat (a) *X Type* (b) *Brad & Spur*



(a)

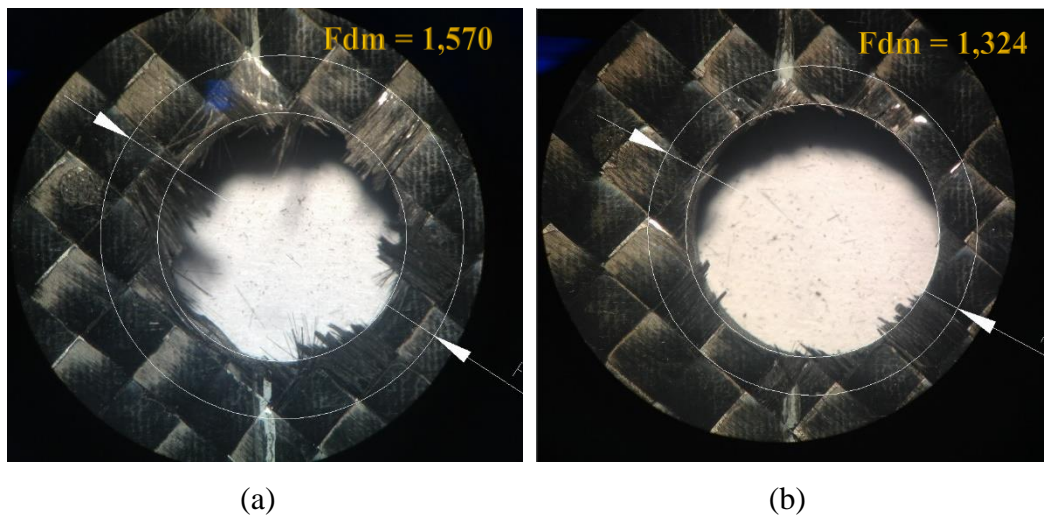


(b)

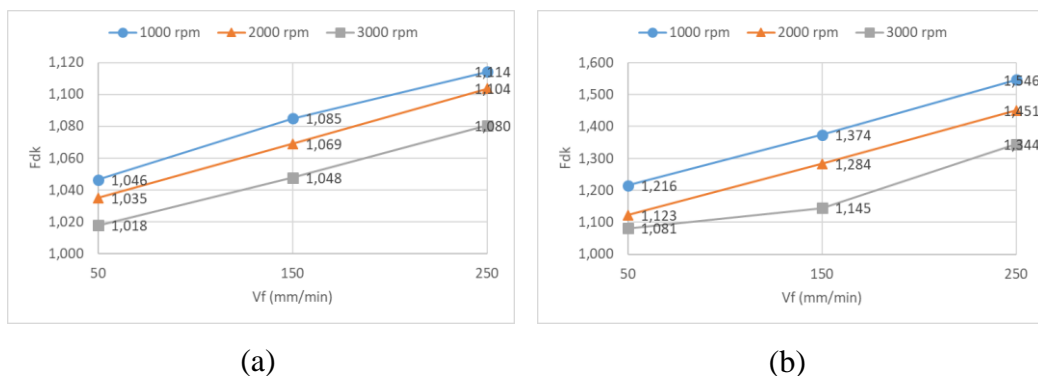
Gambar 4.16 Delaminasi Lubang Keluar untuk (a) Geometri Ujung Pahat *X Type* dan (b) Geometri Ujung Pahat *Brad & Spur* pada Proses Gurdi dengan Kecepatan Spindel 1000 rpm dan Kecepatan Makan 250 mm/min

Gambar 4.15 (a) menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan spindel akan menurunkan besarnya delaminasi lubang keluar pada proses penggurdian CFRP dengan menggunakan geometri ujung pahat *x type*. Fenomena ini juga berlaku

untuk geometri ujung pahat *brad & spur* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.15 (b). Peningkatan kecepatan spindle akan menurunkan gaya tekan yang terjadi pada proses penggurdian (Haijin, 2016). Gaya tekan yang lebih rendah menyebabkan delaminasi lubang keluar menurun (Azmi, 2012), sehingga peningkatan kecepatan spindle akan menurunkan delaminasi lubang keluar seperti ditunjukkan pada Gambar 4.17.



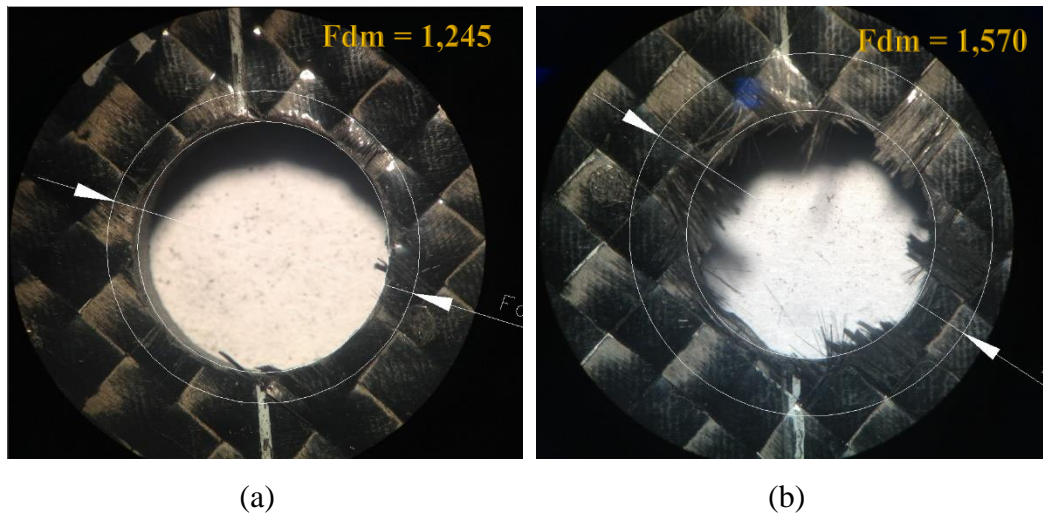
Gambar 4.17 Delaminasi Lubang Keluar untuk (a) Kecepatan Spindel 1000 rpm dan (b) Kecepatan Spindel 3000 rpm pada Proses Gurdi dengan Geometri Ujung Pahat *Brad & Spur* dan Kecepatan Makan 250 mm/min



Gambar 4.18 Pengaruh Kecepatan Makan Terhadap Delaminasi Lubang Keluar Dengan Variasi Kecepatan Spindel Untuk Geometri Ujung Pahat (a) *X Type* (b) *Brad & Spur*

Pengaruh kecepatan makan dengan variasi kecepatan spindle terhadap delaminasi lubang keluar ditunjukkan pada Gambar 4.18. Pada Gambar 4.18

ditunjukkan bahwa penurunan kecepatan makan akan menurunkan delaminasi lubang keluar pada proses penggurdian CFRP. Fenomena ini berlaku untuk geometri ujung pahat *x type* dan *brad & spur*, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.18 (a) dan Gambar 4.18 (b) secara berurutan. Penurunan kecepatan makan pada proses gurdi akan menurunkan gaya tekan (Rochim, 1993). Gaya tekan yang lebih rendah akan menyebabkan delaminasi lubang keluar menurun (Azmi, 2012), sehingga penurunan kecepatan makan akan menurunkan delaminasi lubang masuk seperti ditunjukkan pada Gambar 4.19. Gambar delaminasi lubang keluar dengan variasi kombinasi masing-masing parameter proses, secara lengkap ditunjukkan pada Lampiran C.



Gambar 4.19 Delaminasi Lubang Keluar untuk (a) Kecepatan Makan 50 mm/min dan (b) Kecepatan Makan 250 mm/min pada Proses Gurdi dengan Geometri Ujung Pahat *Brad & Spur* dan Kecepatan Spinde 1000 rpm

]

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen dan proses optimasi yang telah dilakukan pada penelitian yang berjudul “Optimasi Multi Respon Proses Gurdi *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) dengan Metode *Backpropagation Neural Network-Particle Swarm Optimization* (BPNN-PSO)” ini, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Arsitektur jaringan BPNN yang tepat untuk memprediksi nilai respon gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar pada proses gurdi material CFRP adalah:
 - 3-12-4 yang memiliki arti jaringan terdiri dari 3 *input layer*, 1 *hidden layer* dengan 12 *neuron* dan 4 *output layer*.
 - Fungsi-fungsi aktivasi yang digunakan pada *hidden layer*, *output layer* dan pelatihan BPNN secara berturut-turut adalah tansig, purelin, dan trainlm.
2. Pengaturan parameter-parameter proses gurdi dengan menggunakan PSO yang dapat meminimalkan nilai respon gaya tekan, torsi, delaminasi lubang masuk dan delaminasi lubang keluar secara serentak pada penggurdian material *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) adalah:
 - Geometri ujung pahat jenis *x type*.
 - Kecepatan spindel sebesar 2993 rpm.
 - Kecepatan makan sebesar 79 mm/menit.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya berdasarkan penelitian yang dilakukan berhubungan dengan dua hal, yaitu:

1. Perbaikan cara pengambilan gambar delaminasi lubang.

Pengambilan gambar delaminasi dapat dilakukan dengan menggunakan kamera khusus yang terintegrasi langsung dengan mikroskop makro, sehingga gambar delaminasi dapat terlihat dengan jelas.

2. Perbaikan nilai *learning factor* PSO.

Nilai *learning factor* penelitian ini menggunakan nilai *default* dari *toolbox* Matlab 2015a, sehingga mudah terjebak pada *local minimum*. Untuk mengatasinya nilai *learning factor* untuk komponen kecerdasan partikel maupun kecerdasan populasi dapat ditentukan dengan metode *steepest descent*, agar mampu diperoleh nilai parameter proses yang optimal secara cepat dan tidak terjebak pada nilai *local minimum*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abhishek, K., Kumar, V. R., Datta, S., Mahapatra, S. S., (2015), "Parametric Appraisal and Optimization in Machining of CFRP Composites by Using TLBO (Teaching-Learning Based Optimization Algorithm)," *Journal of Intelligent Manufacturing*, hal. 1–17.
- Azmi, A. I., (2012), "Machinability Study of Fibre-Reinforced Polymer Matrix Composites", Tesis Ph. D., University of Auckland, New Zeland.
- Balasubbarreddy, M., Sivanagaraju, S., Suresh, V. C., (2015), "Multi-Objective Optimization in the Presence of Practical Constraints Using Non-Dominated Sorting Hybrid Cuckoo Search Algorithm," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 18, No. 4, hal. 603-615.
- Bonnet, C., Poulachon, G., Rech, J., Girard, Y., Costes, E. P., (2015), "CFRP Drilling: Fundamental Study of Local Feed Force and Consequences on Hole Exit Damage," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 94, hal. 57–64.
- Callister, W. D., dan Rethwisch, D. G., (2007), *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 7th edition, John Wiley&Sons Inc., Versailles: United States of America.
- Capello, E., (2004), "Workpiece Damping and Its Effects on Delamination Damage in Drilling Thin Composite Laminates," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 148, No. 2, hal. 186-195.
- Eneyew, E. D., dan Ramulu, M., (2014), "Experimental Study of Surface Quality and Damage when Drilling Unidirectional CFRP Composites," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 3, No.4, hal. 354–362.
- Grilo, T. J., Paulo, R. M. F., Silva, C. R. M., Davim, J. P., (2013), "Experimental Delamination Analyses of CFRPs using Different Drill Geometries," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 45, No.1, hal. 1344–1350.
- Haijin, W., Jie, S., Jianfeng, L., Laixiao, L., Nan, L., (2016), "Evaluation of Cutting Force and Cutting Temperature in Milling Carbon Fiber-reinforced Polmer Composites," *International Journal Advance Manufacturing Technology*, Vol. 82, No. 9, hal 1517-1525.

- Jones, R. M., (1975), *Mechanics of Composite Materials*, Scripta Book Company, Washington D. C.
- Kalpakjian, S., dan Schmid, S., (2007), *Manufacturing Process for Engineering Materials*, 5th edition, Pearson Education Inc., New Jersey: United States of America.
- Karimi, N. Z., Heidary, H., Fotouhi, M., Minak, G., (2017), “Experimental Analysis of GFRP Laminates Subjected to Compression After Drilling,” *Composite Structures*, Article in press.
- Karnik, S. R., Gaitonde, V. N., Rubio, J. C., Correia, A. E., Abrão, A. M., Davim, J. P., (2008), “Delamination Analysis in High Speed Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) using Artificial Neural Network Model,” *Materials & Design*, Vol. 29, No.9, hal. 1768–1776.
- Kennedy, J., dan Eberhart, R., (1995), “Particle Swarm Optimization,” *Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. 6.
- Khashaba, U. A., (2004), “Delamination in Drilling GFR-Thermoset Composites,” *Composite Structures*, Vol. 63, No. 3-4, hal.313-327.
- Khashaba, U. A., (2012), “Drilling of Polymer Matrix Composites: A Review,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 45, No. 15, hal. 1817-1832.
- Kumar, D., Singh, K. K., Zitoune, R., (2016), “Experimental Investigation of Delamination and Surface Roughness in the Drilling of GFRP Composite Material with Different Drills,” *Advance Manufacturing: Polymer & Composites Science*, Vol. 2, No.2, hal. 47-56.
- Montoya, M., Calamaz, M., Gehin, D., Girot, F., (2013), “Evaluation of the Performance of Coated and Uncoated Carbide Tools in Drilling Thick CFRP/Aluminium Alloy Stacks,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 68, No.9, hal. 2111–2120.
- Mouritz, A., (2012), *Introduction to Aerospace Materials*. Elsevier.
- Nagaraja, Herbert, M. A., Shetty, D., Shetty, R., Shivamurthy, B., (2013), “Effect of Process Parameters on Delamination, Thrust Force, and Torque in Drilling of Carbon Fiber Epoxy Composite,” *Research Journal of Recent Sciences*, Vol. 2, No. 8, hal. 47-51.

- Ozden, I., dan Ghassemieh, E., (2012), "Delamination and Wear in Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites using Multilayer TiAlN/TiN PVD-Coated Tungsten Carbide Tools," *Journal of Reinforced Plastics and Composite*, Vol. 31, No.10, hal. 717–727.
- Palanikumar, K., (2011), "Experimental Investigation and Optimisation in Drilling of GFRP Composites," *Measurement*, Vol. 44, No.10, hal. 2138–2148.
- Rijswijk, K. V., Brouwer, W. D., Beukers, A., (2001), *Application of Natural Fibre Composites in the Development of Rural Societies*. Delft University of Technology, Netherlands.
- Rochim, T., (2001), *Spesifikasi, Metrologi dan Kontrol Kualitas Geometrik*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Rochim, T., (1993), *Proses Permesinan*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Rong, Y., Zhang, Z., Zhang, G., Yue, C., Gu, Y., Yu, H., Wang, C., Xinyu, S., (2015), "Parameters Optimization of Laser Brazing in Crimping Butt using Taguchi and BPNN-GA," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 67, Hal. 94-104.
- Sadek, A., Meshreki, M., Attia, M. H., (2012), "Characterization and Optimization of Orbital Drilling of Woven Carbon Fiber Reinforced Epoxy Laminates," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol.61, No.1, hal.123-126.
- Santosa, B., dan Willy, P., (2011), *Metoda Metaheuristik: Konsep dan Implementasi*, Guna Widya, Surabaya.
- Sardinas, R. Q., Reis, P., Davim, J. P., (2006), "Multi-objective Optimization of Cutting Parameters for Drilling Laminate Composite Materials by Using Genetic Algorithms," *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 15, hal. 3083–3088.
- Schwartz, W. F., (1984), *Composite Materials Handbook*, McGraw-Hill Inc., New York.
- Shunmugesh, K., dan Panneerselvam, K., (2016), "Machinability Study of Carbon Fiber Reinforced Polymer in the Longitudinal and Transverse Direction and Optimization of Process Parameters Using PSO–GSA," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 19, No.3, hal. 1552–1563.

- Siang, J. J., (2009), *Jaringan Syaraf Tiruan dan Pemrogramannya Menggunakan MATLAB*, Edisi kedua, Andi Offset, Yogyakarta.
- Sonbaty, E. I., Khashaba, U. A., Machaly, T., (2004), “Factors Affecting the Machinability of GFR/Epoxy Composites,” *Composite Structures*, Vol. 63, No. 3-4, hal. 329-338.
- Tsao, C. C., (2012), “Evaluation of the Drilling-Induced Delamination of Compound Corespecial Drills using Response Surface Methodology Based on the Taguchi Method,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 62, No.1, hal. 241–247.
- Turki, Y., Habak, M., Velasco, R., Aboura, Z., Khellil, K., Vantomme, P., (2014), “Experimental Investigation of Drilling Damage and Stitching Effects on The Mechanical Behavior of Carbon/Epoxy Composites,” *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.87, hal. 61–72.
- Vlot, A., dan Gunnink, J. W., (2001), *Fibre metal laminates: An Introduction*, Springer, Netherland.
- Ye, L., Lu, Y., Su, Z., Meng, G., (2005), “Functionalized Composite Structures for New Generation Airframes: A Review,”. *Composites Science and Technology*, Vol. 65, hal. 1436-1446

Lampiran A

Susunan layer material carbon fiber reinforced polymer (CFRP) pada bagian rudder pesawat BOEING 737-800

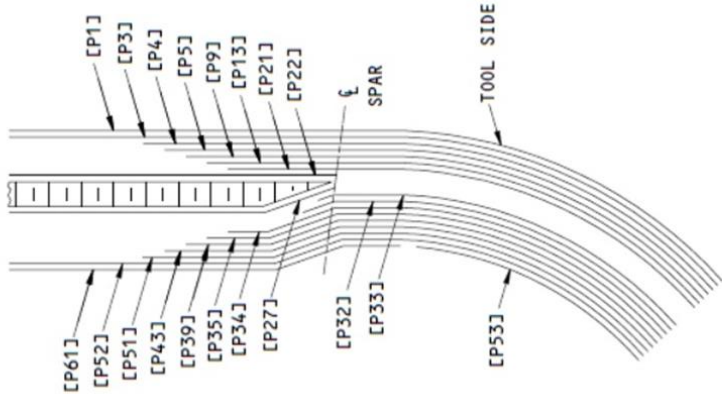


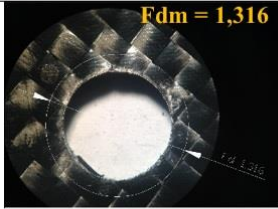
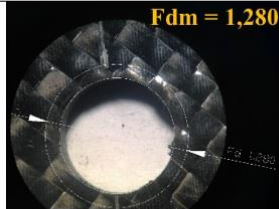
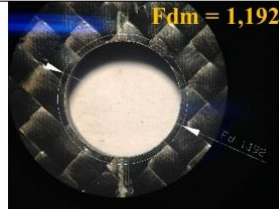
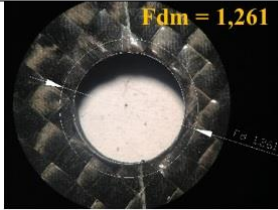
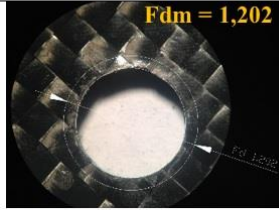
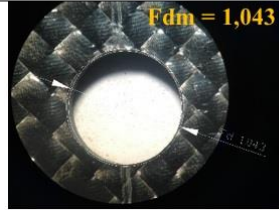
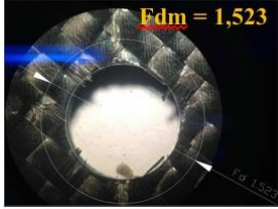
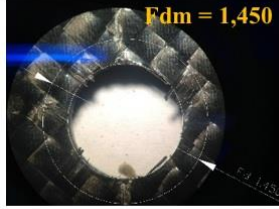
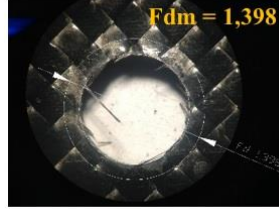
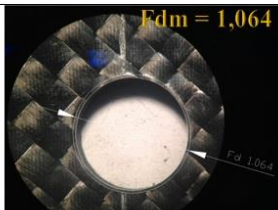
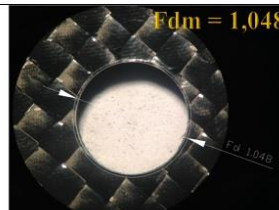
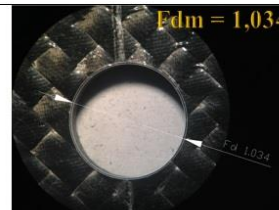
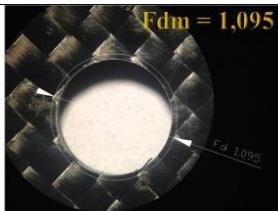

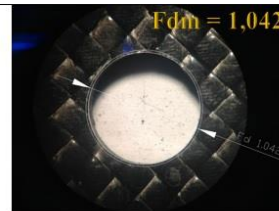
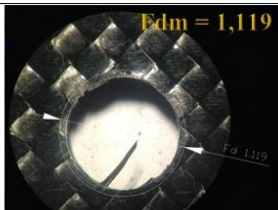
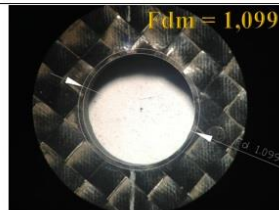
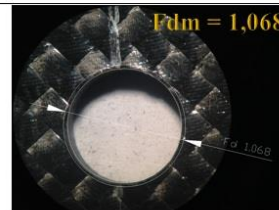
Table 3:

PLY MATERIAL AND DIRECTION FOR FIGURE 3		
PLY	DIRECTION	MATERIAL
P1	-----	Co-cure surfacer as given in BMS 8-341, Type II
P2, P53, P54, P55, P56, P57, P58, P59, P60	Optional	Epoxy impregnated glass woven fabric as given in BMS 8-139, Class III, Style 108
P3, P5, P6, P7, P8, P13, P14, P15, P16, P19, P20, P32, P33, P35, P36, P37, P38, P43, P44, P45, P46, P49, P50, P52	+ or - 45 degrees	Epoxy impregnated graphite woven fabric as given in BMS 8-256, Type IV, Class 2, Style 3K-70-PW
P4, P9, P10, P11, P12, P17, P18, P21, P34, P39, P40, P41, P42, P47, P48, P51	0 or 90 degrees	Epoxy impregnated graphite woven fabric as given in BMS 8-256, Type IV, Class 2, Style 3K-70-PW
P22, P23, P24, P25, P26, P27, P28, P29, P30, P31	-----	Adhesive film as given in BMS 8-245, Type II, Class 1, Grade 03A
P61	-----	1 mil white bondable tedlar film as given in BAC 5315-4

[45/90/45/90/45/90/45/45/adhesivefilm/
90/45/90/45/90/45]

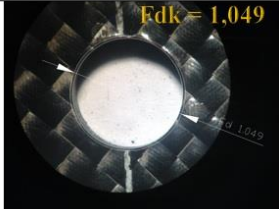
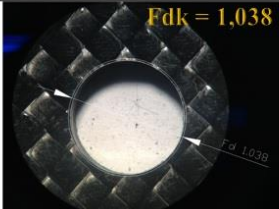
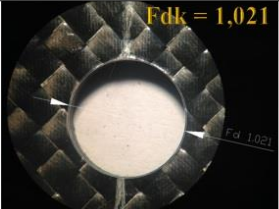
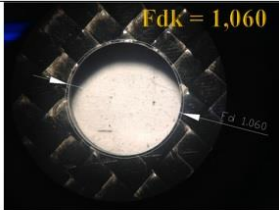
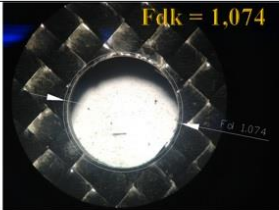
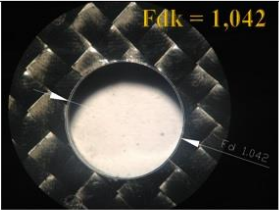
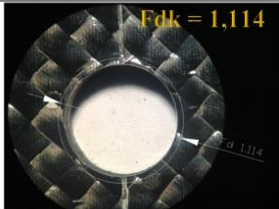
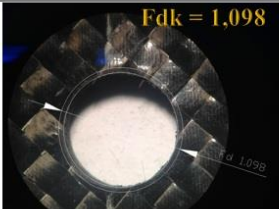
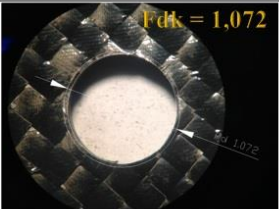
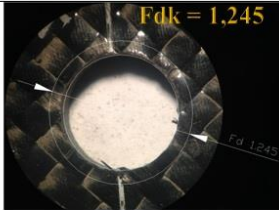
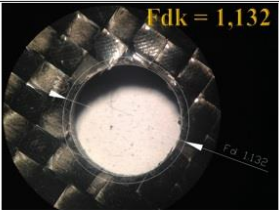
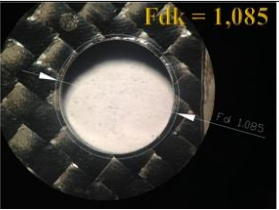
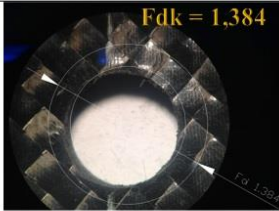
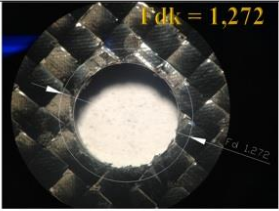
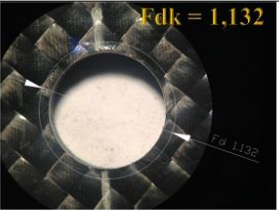
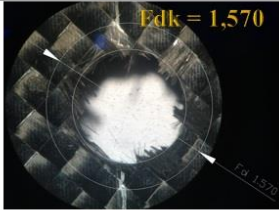
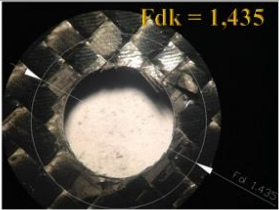
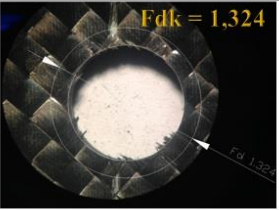
Lampiran B

Tabel L.1 Hasil Pengukuran Delaminasi Lubang Masuk untuk (a) Geometri Ujung Pahat *X Type*, (b) Geometri Ujung Pahat *Brad & Spur*

		Kecepatan Spindel		
		1000 rpm	2000 rpm	3000 rpm
Kecepatan Makan	50 mm/min			
	150 mm/min			
	250 mm/min			
(a)				
		Kecepatan Spindel		
		1000 rpm	2000 rpm	3000 rpm
Kecepatan Makan	50 mm/min			
	150 mm/min			
	250 mm/min			
(b)				

Lampiran C

Tabel L.2 Hasil Pengukuran Delaminasi Lubang Keluar untuk (a) Geometri Ujung Pahat *X Type*, (b) Geometri Ujung Pahat *Brad & Spur*

		Kecepatan Spindel		
		1000 rpm	2000 rpm	3000 rpm
Kecepatan Makan	50 mm/min			
	150 mm/min			
	250 mm/min			
(a)				
		Kecepatan Spindel		
		1000 rpm	2000 rpm	3000 rpm
Kecepatan Makan	50 mm/min			
	150 mm/min			
	250 mm/min			
(b)				

Lampiran D

Bahasa pemrograman perangkat lunak MATLAB R2015a, untuk prediksi nilai respon dengan menggunakan BPNN adalah sebagai berikut:

```
clc, clear ,close all;

global net neuron1 %neuron2 neuron3 neuron4 neuron5 %neuron6 neuron7
neuron8 neuron9 neuron10

variabel_proses = xlsread('CFRP.xlsx',1,'H2:J55');%(1=worksheet)
respon = xlsread('CFRP.xlsx',1,'K2:N55');

%=====
%% Metode Prediksi Back-propagation Neural Network
% Preprocessing data BPNN
p=variabel_proses';
t=respon';
[pn,ps]=mapminmax (p);
[tn,ts]=mapminmax (t);

%untuk 1 hidden layer
xn= 3; % jumlah parameter proses
neuron1= 12;
yn = 4;

% untuk 2 hidden layer
% xn= 3; % jumlah parameter proses
% neuron1= 12;
% neuron2= 12;
% yn = 4;

%untuk 3 hidden layer
% xn= 3; % jumlah parameter proses
% neuron1= 12;
% neuron2= 12;
% neuron3= 12;
% yn = 4;

%untuk 4 hidden layer
% xn= 3; % jumlah parameter proses
% neuron1= 12;
% neuron2= 12;
% neuron3= 12;
% neuron4= 12;
% yn = 4;

%untuk 5 hidden layer
% xn= 3; % jumlah parameter proses
% neuron1= 12;
% neuron2= 12;
% neuron3= 12;
% neuron4= 12;
% neuron5= 12;
% yn = 4;

%Jaringan BPNN
```

```

%1 hidden layer
net = newff(minmax(pn),tn,[neuron1],{'tansig','purelin'},'trainlm');

%2 hidden layer
% net = newff(minmax(pn),tn,[neuron1
neuron2],{'tansig','tansig','purelin'},'trainlm');

%3 hidden layer
% net = newff(minmax(pn),tn,[neuron1 neuron2
neuron3],{'tansig','tansig','tansig','purelin'},'trainlm');

%4 hidden layer
% net = newff(minmax(pn),tn,[neuron1 neuron2 neuron3
neuron4],{'tansig','tansig','tansig','tansig','purelin'},'trainlm');

%5 hidden layer
% net = newff(minmax(pn),tn,[neuron1 neuron2 neuron3 neuron4
neuron5],...
% {'tansig','tansig','tansig','tansig','tansig','purelin'},'trainlm');

%kriteria pemberhentian
net.trainParam.epochs = 10000;
net.trainParam.time = 200;
net.trainParam.goal=1e-4;
net.trainParam.min_grad = 1e-8;
net.trainParam.max_fail = 1000;

%inisialisasi nilai bobot dan bias
net = init(net);

%Data pelatihan BPNN
net.divideParam.TrainRatio = 70/100;
net.divideParam.valRatio = 15/100;
net.divideParam.testRatio = 15/100;

%Laju pembelajaran
net.trainParam.lr=0.05; % learning Rate
net.trainParam.show= 10;

% Pelatihan Jaringan BPNN
[net, tr] = train(net, pn, tn);

%Menghitung Output BPNN
yn = sim(net,pn);
MSE=perform(net,tn,yn)

%Repreprocessing data BPNN
y = mapminmax ('reverse',yn,ts);
output =y';

%=====
%-----plot INDONESIA-----%
%-----plot data full INDONESIA-----%
% Grafik data eksperimen dan data output pelatihan BPNN dengan bahasa
indonesia, hilangkan % untuk mengaktifkan plotting%

% %(a) Gaya Tekan
%
```

```

% subplot(2,2,1)
% plot([1:size(p',1)]', respon(:,1),'-bo', [1:size(p',1)]',output(:,1),'-
r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Gaya Tekan (N)');
%
% %% (b) Torsi
%
% subplot (2,2,2)
% plot ([1:size(p',1)]',respon(:,2),'-bo', [1:size(p',1)]', output
(:,2),'-r*')
% legend('Eksperimen', 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Torsi (Nm)')
%
% %% (c) Delaminasi Lubang Masuk
%
% subplot(2,2,3)
% plot([1:size(p',1)]', respon(:,3),'-bo', [1:size(p',1)]',output(:,3),'-
r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Delaminasi Lubang Masuk');
%
% %% (d) Delaminasi Lubang Keluar
%
% subplot(2,2,4)
% plot([1:size(p',1)]', respon(:,4),'-bo', [1:size(p',1)]',output(:,4),'-
r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Delaminasi Lubang Keluar');

% % -----plot data training-----% %
% % (a) Gaya Tekan
%
% subplot(2,2,1)
% plot([1:size(tr.trainInd',1)]', respon(tr.trainInd',1),'-bo',
[1:size(tr.trainInd',1)]',output(tr.trainInd',1),'-r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Gaya Tekan (N)');
%
% % (b) Torsi
%
% subplot (2,2,2)
% plot ([1:size(tr.trainInd',1)]',respon(tr.trainInd',2),'-bo',
[1:size(tr.trainInd',1)]', output (tr.trainInd',2),'-r*')
% legend('Eksperimen', 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Torsi (Nm)')
%
% % (c) Delaminasi Lubang Masuk
%
% subplot(2,2,3)
% plot([1:size(tr.trainInd',1)]', respon(tr.trainInd',3),'-bo',
[1:size(tr.trainInd',1)]',output(tr.trainInd',3),'-r*')

```



```

% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Delaminasi Lubang Masuk');%
%
% % (d) Delaminasi Lubang Keluar
%
% subplot(2,2,4)
% plot([1:size(tr.trainInd',1)]', respon(tr.trainInd',4),'-bo',
[1:size(tr.trainInd',1)]',output(tr.trainInd',4),'-r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Delaminasi Lubang Keluar');

% %-----plot data testing-----% %
% % (a) Gaya Tekan
%
% subplot(2,2,1)
% plot([1:size(tr.testInd',1)]', respon(tr.testInd',1),'-bo',
[1:size(tr.testInd',1)]',output(tr.testInd',1),'-r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Gaya Tekan (N)');
%
% % (b) Torsi
%
% subplot (2,2,2)
% plot ([1:size(tr.testInd',1)]',respon(tr.testInd',2),'-bo',
[1:size(tr.testInd',1)]', output (tr.testInd',2),'-r*')
% legend('Eksperimen', 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Torsi (Nm)')
%
% % (c) Delaminasi Lubang Masuk
%
% subplot(2,2,3)
% plot([1:size(tr.testInd',1)]', respon(tr.testInd',3),'-bo',
[1:size(tr.testInd',1)]',output(tr.testInd',3),'-r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Delaminasi Lubang Masuk');%
%
% % (d) Delaminasi Lubang Keluar
%
% subplot(2,2,4)
% plot([1:size(tr.testInd',1)]', respon(tr.testInd',4),'-bo',
[1:size(tr.testInd',1)]',output(tr.testInd',4),'-r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Delaminasi Lubang Keluar');

% -----plot data validasi-----% %
% % (a) Gaya Tekan
%
% subplot(2,2,1)
% plot([1:size(tr.valInd',1)]', respon(tr.valInd',1),'-bo',
[1:size(tr.valInd',1)]',output(tr.valInd',1),'-r*')
% legend('Eksperimen' , 'BPNN',2)

```

```

% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Gaya Tekan (N)');
%
% % (b) Torsi
%
% subplot (2,2,2)
% plot ([1:size(tr.valInd',1)]', respon(tr.valInd',2), '-bo',
[1:size(tr.valInd',1)]', output (tr.valInd',2), '-r*')
% legend('Eksperimen', 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Torsi (Nm)')
%
% % (c) Delaminasi Lubang Masuk
%
% subplot(2,2,3)
% plot([1:size(tr.valInd',1)]', respon(tr.valInd',3), '-bo',
[1:size(tr.valInd',1)]', output(tr.valInd',3), '-r*')
% legend('Eksperimen', 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Delaminasi Lubang Masuk');%
%
% % (d) Delaminasi Lubang Keluar
%
% subplot(2,2,4)
% plot([1:size(tr.valInd',1)]', respon(tr.valInd',4), '-bo',
[1:size(tr.valInd',1)]', output(tr.valInd',4), '-r*')
% legend('Eksperimen', 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Delaminasi Lubang Keluar');
%
%
%
%=====
%-----plot INGGRIS-----%
%-----plot data full -----%
% Grafik data eksperimen dan data output pelatihan BPNN dengan bahasa
inggris, hilangkan % untuk mengaktifkan plotting%

% %(a) Thrust Force
%
% subplot(2,2,1)
% plot([1:size(p',1)]', respon(:,1), '-bo', [1:size(p',1)]', output(:,1), '-r*')
% legend('Experiment', 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Thrust Force (N)');
%
% %(b) Torque
%
% subplot (2,2,2)
% plot ([1:size(p',1)]', respon(:,2), '-bo', [1:size(p',1)]', output
(:,2), '-r*')
% legend('Experiment', 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Torque (Nm)')
%
% %(c) Hole Entry Delamination
%

```

```

% subplot(2,2,3)
% plot([1:size(p',1)]', respon(:,3),'-bo', [1:size(p',1)]',output(:,3),'-
r*')
% legend('Experiment' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Hole Entry Delamination');
%
% %% (d) Hole Exit Delamination
%
% subplot(2,2,4)
% plot([1:size(p',1)]', respon(:,4),'-bo', [1:size(p',1)]',output(:,4),'-
r*')
% legend('Experiment' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Hole Exit Delamination');

% -----plot data training-----%
% % (a) Thrust Force
%
% subplot(2,2,1)
% plot([1:size(tr.trainInd',1)]', respon(tr.trainInd',1),'-bo',
[1:size(tr.trainInd',1)]',output(tr.trainInd',1),'-r*')
% legend('Experiment' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Thrust Force (N)');
%
% % (b) Torque
%
% subplot (2,2,2)
% plot ([1:size(tr.trainInd',1)]',respon(tr.trainInd',2),'-bo',
[1:size(tr.trainInd',1)]', output (tr.trainInd',2),'-r*')
% legend('Experiment', 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Torque (Nm)')
%
% % (c) Hole Entry Delamination
%
% subplot(2,2,3)
% plot([1:size(tr.trainInd',1)]', respon(tr.trainInd',3),'-bo',
[1:size(tr.trainInd',1)]',output(tr.trainInd',3),'-r*')
% legend('Experiment' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Hole Entry Delamination');%
%
% % (d) Hole Exit Delamination
%
% subplot(2,2,4)
% plot([1:size(tr.trainInd',1)]', respon(tr.trainInd',4),'-bo',
[1:size(tr.trainInd',1)]',output(tr.trainInd',4),'-r*')
% legend('Experiment' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Hole Exit Delamination');

% %-----plot data testing-----%
% % (a) Thrust Force
%
% subplot(2,2,1)

```



```

% plot([1:size(tr.testInd',1)]', respon(tr.testInd',1),'-bo',
[1:size(tr.testInd',1)]',output(tr.testInd',1),'-r*')
% legend('Experiment' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Thrust Force (N)');
%
% % (b) Torque
%
% subplot (2,2,2)
% plot ([1:size(tr.testInd',1)]',respon(tr.testInd',2),'-bo',
[1:size(tr.testInd',1)]', output (tr.testInd',2),'-r*')
% legend('Experiment', 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Torque (Nm)')
%
% % (c) Hole Entry Delamination
%
% subplot(2,2,3)
% plot([1:size(tr.testInd',1)]', respon(tr.testInd',3),'-bo',
[1:size(tr.testInd',1)]',output(tr.testInd',3),'-r*')
% legend('Experiment' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Hole Entry Delamination');%
%
% % (d) Hole Exit Delamination
%
% subplot(2,2,4)
% plot([1:size(tr.testInd',1)]', respon(tr.testInd',4),'-bo',
[1:size(tr.testInd',1)]',output(tr.testInd',4),'-r*')
% legend('Experiment' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Hole Exit Delamination');

% -----plot data validasi-----%
% % (a) Thrust Force
%
% subplot(2,2,1)
% plot([1:size(tr.valInd',1)]', respon(tr.valInd',1),'-bo',
[1:size(tr.valInd',1)]',output(tr.valInd',1),'-r*')
% legend('Experiment' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Thrust Force (N)');
%
% % (b) Torque
%
% subplot (2,2,2)
% plot ([1:size(tr.valInd',1)]',respon(tr.valInd',2),'-bo',
[1:size(tr.valInd',1)]', output (tr.valInd',2),'-r*')
% legend('Experiment', 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Torque (Nm)')
%
% % (c) Hole Entry Delamination
%
% subplot(2,2,3)
% plot([1:size(tr.valInd',1)]', respon(tr.valInd',3),'-bo',
[1:size(tr.valInd',1)]',output(tr.valInd',3),'-r*')
% legend('Experiment' , 'BPNN',2)

```

```

% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Hole Entry Delamination');%
%
% % (d) Hole Exit Delamination
%
% subplot(2,2,4)
% plot([1:size(tr.valInd',1)]', respon(tr.valInd',4),'-bo',
[1:size(tr.valInd',1)]',output(tr.valInd',4),'-r*')
% legend('Experiment' , 'BPNN',2)
% grid on
% xlabel ('Data No- ');
% ylabel ('Hole Exit Delamination');
% %

%=====
%-----plot excel-----&&
% Ploting ke excel untuk data normalisasi, prediksi training, testing,
dan validasi, hilangkan % untuk mengaktifkan plotting%

% A = mapminmax (t);
% xlswrite('data_normalisasi.xls', respon, 'full', 'A1');
% xlswrite('data_normalisasi.xls', A, 'full', 'F1');
%
% xlswrite('data_prediksi_full_tesis.xls', respon, 'full', 'A1');
% xlswrite('data_prediksi_full_tesis.xls', output, 'full', 'E1');
%
% xlswrite('data_prediksi_training_tesis.xls', tr.trainInd' , 'data
training', 'A1');
% xlswrite('data_prediksi_training_tesis.xls', respon(tr.trainInd',1) ,
'data training', 'B1');
% xlswrite('data_prediksi_training_tesis.xls', output(tr.trainInd',1) ,
'data training', 'C1');
% xlswrite('data_prediksi_training_tesis.xls', respon(tr.trainInd',2) ,
'data training', 'D1');
% xlswrite('data_prediksi_training_tesis.xls', output(tr.trainInd',2) ,
'data training', 'E1');
% xlswrite('data_prediksi_training_tesis.xls', respon(tr.trainInd',3) ,
'data training', 'F1');
% xlswrite('data_prediksi_training_tesis.xls', output(tr.trainInd',3) ,
'data training', 'G1');
% xlswrite('data_prediksi_training_tesis.xls', respon(tr.trainInd',4) ,
'data training', 'H1');
% xlswrite('data_prediksi_training_tesis.xls', output(tr.trainInd',4) ,
'data training', 'I1');
%
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', tr.testInd' , 'data testing',
'A1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', respon(tr.testInd',1) , 'data
testing', 'B1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', output(tr.testInd',1) , 'data
testing', 'C1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', respon(tr.testInd',2) , 'data
testing', 'D1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', output(tr.testInd',2) , 'data
testing', 'E1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', respon(tr.testInd',3) , 'data
testing', 'F1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', output(tr.testInd',3) , 'data
testing', 'G1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', respon(tr.testInd',4) , 'data
testing', 'H1');

```

```

% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', output(tr.testInd',4) , 'data
testing', 'I1');
%
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', tr.valInd' , 'data validasi',
'A1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', respon(tr.valInd',1) , 'data
validasi', 'B1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', output(tr.valInd',1) , 'data
validasi', 'C1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', respon(tr.valInd',2) , 'data
validasi', 'D1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', output(tr.valInd',2) , 'data
validasi', 'E1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', respon(tr.valInd',3) , 'data
validasi', 'F1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', output(tr.valInd',3) , 'data
validasi', 'G1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', respon(tr.valInd',4) , 'data
validasi', 'H1');
% xlswrite('data_prediksi_tesis.xls', output(tr.valInd',4) , 'data
validasi', 'I1');

```

Lampiran E

Bahasa pemrograman perangkat lunak MATLAB R2015a, untuk penentuan fungsi fitness adalah sebagai berikut:

```
function fitness = FitnessCFRP(x)
global net

%Nilai Akhir Bobot dan Bias
u = net.IW{1,1};
v = net.LW{2,1};
u0= net.b{1};
v0= net.b{2};

%% Data bobot dan bias
% u =
%   0.1435    2.3276   -1.9996
%   2.0452   -2.0552   -1.0985
%   1.4909    0.0868   -2.4983
%   0.8516   -1.8658    1.5804
%   1.9941    1.1044    1.5085
%  -2.4574   -0.8916   -0.3433
%   2.3638    2.0585    0.1674
%  -0.7018   -0.9548    2.5739
%   0.7408    0.8484   -2.8463
%  -1.5717   -1.7911    1.4176
%  -1.5077    0.5578   -3.2698
%   0.5053    3.0042   -2.1574];
%
%
% v =
%  -0.1341    0.2173   -0.3350    0.3054    0.1044   -0.2671   -0.0269
%  0.8173    0.8003   -0.3745    0.0552    0.0280
%  -0.1611    0.3390   -0.1262    0.2018    0.4201    0.0067   -0.2428
% -0.2170   -0.1438   -0.2081   -0.0351   -0.0747
%  -0.3731    0.9557   -0.0142   -0.3605    1.3137    0.9366   -0.4234
%  0.3629   -0.1011    1.7945    0.3909    1.3352
%  -0.1422    0.0500   -0.2184    0.3924   -0.1274   -0.4239   -0.0647
% -0.2662   -0.3584   -0.6281   -0.0020   -0.0820];
%
% u0 =
%   3.3123
%  -2.3887
%  -1.8060
%  -0.6125
%  -0.9812
%   1.2485
%   0.2947
%  -1.1011
%   1.1444
%  -3.1164
%  -2.5200
%   3.1045];
%
%
% v0 =
%  -0.6212
%  -0.1589
%   1.4548
%  -0.6910];
```

```

%-----persamaan-----
% % input layer ke hidden layer
z1=u(1,1)*x(1)+u(1,2)*x(2)+u(1,3)*x(3)+u0(1,1);
z2=u(2,1)*x(1)+u(2,2)*x(2)+u(2,3)*x(3)+u0(2,1);
z3=u(3,1)*x(1)+u(3,2)*x(2)+u(3,3)*x(3)+u0(3,1);
z4=u(4,1)*x(1)+u(4,2)*x(2)+u(4,3)*x(3)+u0(4,1);
z5=u(5,1)*x(1)+u(5,2)*x(2)+u(5,3)*x(3)+u0(5,1);
z6=u(6,1)*x(1)+u(6,2)*x(2)+u(6,3)*x(3)+u0(6,1);
z7=u(7,1)*x(1)+u(7,2)*x(2)+u(7,3)*x(3)+u0(7,1);
z8=u(8,1)*x(1)+u(8,2)*x(2)+u(8,3)*x(3)+u0(8,1);
z9=u(9,1)*x(1)+u(9,2)*x(2)+u(9,3)*x(3)+u0(9,1);
z10=u(10,1)*x(1)+u(10,2)*x(2)+u(10,3)*x(3)+u0(10,1);
z11=u(11,1)*x(1)+u(11,2)*x(2)+u(11,3)*x(3)+u0(11,1);
z12=u(12,1)*x(1)+u(12,2)*x(2)+u(12,3)*x(3)+u0(12,1);

% hidden layer ke output layer
FZ=(v(1,1)*((2/(1+exp(-2*z1)))-1)+ v(1,2)*((2/(1+exp(-2*z2)))-1)+
v(1,3)*((2/(1+exp(-2*z3)))-1)+ v(1,4)*((2/(1+exp(-2*z4)))-1)+
v(1,5)*((2/(1+exp(-2*z5)))-1)+ v(1,6)*((2/(1+exp(-2*z6)))-1)+
v(1,7)*((2/(1+exp(-2*z7)))-1)+ v(1,8)*((2/(1+exp(-2*z8)))-
1)+v(1,9)*((2/(1+exp(-2*z9)))-1)+ v(1,10)*((2/(1+exp(-2*z10)))-1)+
v(1,11)*((2/(1+exp(-2*z11)))-1)+ v(1,12)*((2/(1+exp(-2*z12)))-1)+
v0(1,1));
MZ=(v(2,1)*((2/(1+exp(-2*z1)))-1)+ v(2,2)*((2/(1+exp(-2*z2)))-1)+
v(2,3)*((2/(1+exp(-2*z3)))-1)+ v(2,4)*((2/(1+exp(-2*z4)))-1)+
v(2,5)*((2/(1+exp(-2*z5)))-1)+ v(2,6)*((2/(1+exp(-2*z6)))-1)+
v(2,7)*((2/(1+exp(-2*z7)))-1)+ v(2,8)*((2/(1+exp(-2*z8)))-
1)+v(2,9)*((2/(1+exp(-2*z9)))-1)+ v(2,10)*((2/(1+exp(-2*z10)))-1)+
v(2,11)*((2/(1+exp(-2*z11)))-1)+ v(2,12)*((2/(1+exp(-2*z12)))-1)+
v0(2,1));
FDM=(v(3,1)*((2/(1+exp(-2*z1)))-1)+ v(3,2)*((2/(1+exp(-2*z2)))-1)+
v(3,3)*((2/(1+exp(-2*z3)))-1)+ v(3,4)*((2/(1+exp(-2*z4)))-1)+
v(3,5)*((2/(1+exp(-2*z5)))-1)+ v(3,6)*((2/(1+exp(-2*z6)))-1)+
v(3,7)*((2/(1+exp(-2*z7)))-1)+ v(3,8)*((2/(1+exp(-2*z8)))-
1)+v(3,9)*((2/(1+exp(-2*z9)))-1)+ v(3,10)*((2/(1+exp(-2*z10)))-1)+
v(3,11)*((2/(1+exp(-2*z11)))-1)+ v(3,12)*((2/(1+exp(-2*z12)))-1)+
v0(3,1));
FDK=(v(4,1)*((2/(1+exp(-2*z1)))-1)+ v(4,2)*((2/(1+exp(-2*z2)))-1)+
v(4,3)*((2/(1+exp(-2*z3)))-1)+ v(4,4)*((2/(1+exp(-2*z4)))-1)+
v(4,5)*((2/(1+exp(-2*z5)))-1)+ v(4,6)*((2/(1+exp(-2*z6)))-1)+
v(4,7)*((2/(1+exp(-2*z7)))-1)+ v(4,8)*((2/(1+exp(-2*z8)))-
1)+v(4,9)*((2/(1+exp(-2*z9)))-1)+ v(4,10)*((2/(1+exp(-2*z10)))-1)+
v(4,11)*((2/(1+exp(-2*z11)))-1)+ v(4,12)*((2/(1+exp(-2*z12)))-1)+
v0(4,1));

% persamaan fitness
fitness = min(FZ+MZ+FDM+FDK);

```

Lampiran F

Bahasa pemrograman perangkat lunak MATLAB R2015a, untuk optimasi dengan menggunakan metode PSO adalah sebagai berikut:

```
clc;
N=100;
maxit=1000;
dim = 3; % jumlah parameter proses
upbnd =[2 3000 250]; % batas atas parameter proses
lwbnd =[1 1000 50]; % batas bawah parameter proses
% Initializing swarm and velocities
a = rand(N,dim).*repmat((upbnd-lwbnd),N,1) + repmat(lwbnd,N,1) ; %posisi
partikel
b = rand(N,dim); %kecepatan awal
x = round(a);
v = round(b);
[brs,kol]=size(x);
f=zeros(N,1);
%bobot inertia

for i=1:brs
f(i)=feval(@FitnessCFRP,x(i,:));
end
it=1;
Pbest=x;
fbest=f;
[minf,idk]=min(f);
Gbest=x(idk,:);
%lastbest=[0 0];
minftot=[];

rhomax=0.9;rhomin=0.4;
for it=1:maxit
rho(it)=rhomax-((rhomax-rhomin)/maxit)*it;
end
while it<maxit
r1=rand;r2=rand;
for j=1:brs
v(j,:)=rho(it)*v(j,:)+r1.*(Pbest(j,:)-x(j,:))+r2.*(Gbest-x(j,:));
x(j,:)=x(j,:)+v(j,:);
f(j)=feval(@FitnessCFRP,x(j,:));
end
%update Pbest
changerow = f < fbest;
fbest=fbest.*(1-changerow)+f.*changerow;
Pbest(find(changerow),:)=x(find(changerow),:);
[minf,idk]=min(fbest);
minftot=[minftot;minf];
Gbest=Pbest(idk,:);
if sum(var(Pbest))<1e-8
break
end
it=it+1;
lastbest=Gbest;
end
xopt=Gbest
fmin=minf
plot(minftot)
norm1 = (2*(xopt(1,1)-1)/(2-1))-1;
norm2 = (2*(xopt(1,2)-1000)/(3000-1000))-1;
```

```

norm3 = (2*(xopt(1,3)-50)/(250-50))-1;

n=[norm1 norm2 norm3];
yb=sim(net,n');
Respon_Optimal = mapminmax('reverse',yb,ts)
fprintf('\n Iterasi ke-      =%g \n',tr.best_epoch);
fprintf('\n MSE          =%g\n',tr.best_perf);

```

Lampiran G

Tabel L.3 Nilai-nilai bobot dan bias BPNN, (a) nilai bobot dan bias dari *input layer* ke *hidden layer*, (b) nilai bobot dan bias dari *hidden layer* ke *output layer*

Neuron					(a) Nilai bobot dan bias dari <i>input layer</i> ke <i>hidden layer</i>								Bias
	Bobot												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	-0.1341	0.2173	-0.335	0.3054	0.1044	-0.2671	-0.0269	0.8173	0.8003	-0.3745	0.0552	0.028	-0.6212
2	-0.1611	0.339	-0.1262	0.2018	0.4201	0.0067	-0.2428	-0.217	-0.1438	-0.2081	-0.0351	-0.0747	-0.1589
3	-0.3731	0.9557	-0.0142	-0.3605	1.3137	0.9366	-0.4234	0.3629	-0.1011	1.7945	0.3909	1.3352	1.4548
4	-0.1422	0.05	-0.2184	0.3924	-0.1274	-0.4239	-0.0647	-0.2662	-0.3584	-0.6281	-0.002	-0.082	-0.691

Lampiran H

One-Sample T: Gaya Tekan

Test of mu = 22.99 vs not = 22.99

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Gaya Tekan	5	22.116	1.100	0.492	(20.751, 23.481)	-1.78	0.150

One-Sample T: Torsi

Test of mu = 0.634 vs not = 0.634

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Torsi	5	0.63560	0.01074	0.00480	(0.62227, 0.64893)	0.33	0.756

One-Sample T: Fdm

Test of mu = 1.132 vs not = 1.132

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Fdm	5	1.1302	0.0256	0.0115	(1.0984, 1.1620)	-0.16	0.883

One-Sample T: Fdk

Test of mu = 1,028 vs not = 1,028

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Fdk	5	1,03400	0,01398	0,00625	(1,01664; 1,05136)	0,96	0,392

BIOGRAFI PENULIS



Penulis merupakan anak terakhir dari dua bersaudara. Dilahirkan di kota Surabaya pada tanggal 18 Pebruari 1991. Penulis memulai pendidikannya di TK Sahasraya, kemudian SDN Pepelegi 1 Sidoarjo, SMP Negeri 6 Sidoarjo, SMA Negeri 17 Surabaya, D3 Teknik Mesin ITS, dan S1 Teknik Mesin ITS. Penulis melanjutkan studi S2 di Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2015, dengan konsentrasi bidang Rekayasa Sistem Manufaktur. Penulis aktif berorganisasi semenjak SMA dan diamanahi sebagai Ketua Umum OSIS SMA Negeri 17 Surabaya pada kelas 11. Semasa kuliah penulis diamanahi sebagai *steering committee* pengkaderan pada periode 2010 dan 2011, kemudian pada tahun 2011 penulis juga diamanahi menjadi Wakil Ketua Himpunan D3 Teknik Mesin ITS. Dalam bidang akademik penulis tertarik pada bidang proses pemesinan, optimasi proses pemesinan dan rekayasa material. Untuk diskusi, saran, maupun kritik penulis dapat dihubungi melalui email rachmadinorcahyo@gmail.com.

